



João Tiago Leomaro dos Santos

Licenciatura em Engenharia do Ambiente

**Valorização de insolúveis da cal
provenientes do tratamento de água para
abastecimento público no espessamento
de lamas de estações de tratamento de
água residual**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente-Perfil Engenharia Sanitária

Orientador: Prof. Doutor António Pedro de Macedo Coimbra Mano

Júri:

Presidente: Prof.^a Doutora Leonor Miranda Monteiro do Amaral

Arguente: Eng.^o Pedro Miguel Fontes de Matos

Vogal: Prof. Doutor António Pedro de Macedo Coimbra Mano



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2019

Valorização de insolúveis da cal provenientes do tratamento de água para abastecimento público no espessamento de lamas de estações de tratamento de água residual

Copyright © João Tiago Leomaro dos Santos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor António Pedro Mano, pela oportunidade e orientação da presente dissertação, pelo saber partilhado, por todo o apoio prestado durante a realização deste trabalho, e durante todos os anos de aulas.

Ao Eng.º Pedro Fontes pela oportunidade de desenvolver esta dissertação de mestrado.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia pela formação e amizades que me proporcionou ao longo do meu percurso académico.

À dona Luísa e à dona Adélia, pelo apoio, companheirismo e boa disposição no laboratório.

Aos meus grandes amigos académicos e não académicos, em especial ao Baptista, ao Zé, ao Manuel e à Rafa, pela amizade e pelo companheirismo, sem vocês isto não seria possível.

À minha namorada, Bianca Sofia Teixeira, por toda a paciência, amor e carinho demonstrado ao longo deste percurso, eu sei que não foi fácil.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer aos meus pais, Maria de Lurdes Leomaro e João Manuel Santos, pela fé, paciência, apoio e amor que me levou a lutar pelo meu futuro, e por todos os sacrifícios que possibilitaram a concretização deste meu percurso académico. Esta dissertação é dedicada a eles.

A todos os mencionados e não mencionados, o meu mais sincero obrigado.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo contribuir para o estudo da valorização de insolúveis da cal provenientes do tratamento da água para abastecimento público, no espessamento de lamas de ETAR.

Foram utilizados insolúveis da cal provenientes da ETA da Asseiceira como coagulante, em ensaios de sedimentação com lamas provenientes da ETAR de Castelo Branco, com o objetivo de avaliar o potencial efeito do coagulante na sedimentação das lamas, bem como na qualidade do sobrenadante. O condicionamento das lamas foi efetuado em Jar-Test.

Foram igualmente efetuados ensaios de sedimentação com cal hidratada, por forma a comparar os resultados obtidos.

Os ensaios realizados permitiram concluir que a utilização do coagulante em estudo nas lamas primárias foi benéfica para a sedimentação das lamas tendo permitido obter remoções de SST entre 81-96%; de SSV entre 57-94%; da CQO entre 34-53% e de fósforo entre 72-99%. A utilização de cal comercial nas mesmas concentrações que o coagulante não se mostrou eficaz na melhoria da sedimentação das lamas primárias. No entanto, com quantidades utilizadas foi possível remover até 50% dos sólidos suspensos totais e 73% dos sólidos suspensos voláteis do sobrenadante. Na remoção de CQO e fósforo, o doseamento de cal comercial não se mostrou eficaz.

O doseamento de insolúveis da cal em lamas biológicas não permitiu obter melhorias na velocidade de sedimentação das lamas. No entanto, foi possível obter eficiências de remoção de SST entre 23-60%; de SSV entre 15-62%; de CQO entre 14-71% e de fósforo entre 87-95%. O doseamento de cal comercial não foi eficaz na melhoria da velocidade de sedimentação das lamas biológicas, embora tenha-se mostrado eficaz na remoção de SST, SSV, CQO e Pt.

De um modo geral, o recurso aos insolúveis da cal mostrou ser mais eficaz do que a cal comercial na melhoria da sedimentação de lamas e na remoção de SST, SSV, CQO e Pt, pelo que poderá constituir uma alternativa viável.

Palavras-Chave: Insolúveis da cal; Sedimentação; Lamas; ETAR; Espessamento.

Abstract

The present work intends to contribute to the study regarding the use of lime precipitates, a byproduct that result from the water treatment, in the thickening of WWTP sludge.

The lime precipitates were used as a coagulant in sludge settling tests, with sludge from the WWTP of Castelo Branco. The tests were simulated in measuring cylinders of 1L in order to evaluate the potential effect of the coagulant on sludge settleability, and in the quality of the supernatant. Sludge conditioning was performed in Jar-Test. Settling tests with hydrated lime conditioned sludge were also carried, in order to compare the obtained results.

Based on the tests, the use of lime precipitates in primary sludge proved beneficial to their settleability. Also, it achieved removal efficiencies for TSS from 81% to 96%; for TVS from 57% to 94%; for COD from 34% to 53% and for phosphorus from 72% to 99%. The use of hydrated lime in primary sludge didn't improve the primary sludge settleability. However, it was possible to remove up to 50% of TSS and 73% of TSV from the supernatant. In the removal of COD and phosphorus, the hydrated lime usage wasn't effective.

The use of the coagulant in biological sludge didn't improve their settleability. However, it was possible to achieve removal efficiencies for TSS from 23% to 60%; for TVS from 15% to 62%; for COD from 14% to 71% and for phosphorus from 87% to 95%. Hydrated lime dosing didn't improve the settleability of biological sludge, although it proved to be effective in removing TSS, TVS, COD and phosphorus.

All things considered, the coagulant has proven to be more effective than hydrated lime in improving sludge settleability and removing TSS, TVS, COD and phosphorus from the supernatant, which makes lime precipitates a viable alternative.

Keywords: Lime precipitates; Settling; Sludge; WWTP; Thickening.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento Geral	1
1.2.	Objetivo	2
2.	Revisão Bibliográfica	3
2.1.	Produção de lamas.....	3
2.2.	Tratamento de lamas.....	3
2.2.1.	Espessamento.....	5
2.2.2.	Estabilização	9
2.2.3.	Desidratação	10
2.3.	Condicionamento de lamas	14
2.3.1.	Fatores que afetam o condicionamento	14
2.3.2.	Condicionamento químico.....	15
2.3.3.	Condicionamento físico.....	18
2.4.	Sedimentação.....	21
3.	Plano experimental.....	25
4.	Características sumárias da ETA da Asseiceira e da ETAR de Castelo Branco	27
4.1.	Caracterização da ETA da Asseiceira	27
4.2.	Caracterização da ETAR de Castelo Branco.....	28
5.	Metodologia	31
5.1.	Jar-test.....	31
5.2.	Ensaio de Sedimentação	31
5.3.	Medição de parâmetros	32
5.4.	Fase 1.....	32
5.5.	Fase 2.....	35
5.6.	Fase 3.....	37
5.7.	Fase 4.....	42

6.	Resultados e Discussão	49
6.1.	Fase 1.....	49
6.2.	Fase 2.....	53
6.3.	Fase 3.....	59
6.4.	Fase 4.....	72
6.5.	Análise comparativa	85
7.	Conclusões.....	89
8.	Referências Bibliográficas	91
	Anexo I – Metodologia para a determinação do pH	95
	Anexo II – Sólidos em suspensão totais, voláteis e não voláteis.....	97
	Anexo III – Metodologia para determinação da CQO.....	98
	Anexo IV- Metodologia para a determinação da CQO (HACH-LANGE)	100
	Anexo V – Metodologia para determinação do Fósforo total.....	103
	Anexo VI – Metodologia para determinação do Fósforo total (HACH-LANGE)	105
	Anexo VII – Análise à composição iónica da amostra de insolúveis da cal.....	107

Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Vantagens e desvantagens dos métodos de espessamento	8
Tabela 2.2- Descrição dos principais processos de estabilização.....	9
Tabela 2.3- Vantagens e desvantagens dos principais métodos de desidratação de lamas	13
Tabela 2.4- Doses características de polímero utilizadas na desidratação de lamas.	18
Tabela 2.5- Vantagens e desvantagens de diversos tipos de condicionamento de lamas.....	20
Tabela 3.1- Plano experimental.....	25
Tabela 5.1-Intervalo de doseamento de cal comercial, testado no Laboratório da FCT.	34
Tabela 5.2- Intervalo de doseamento de cal comercial, testado na ETAR de Castelo Branco.....	35
Tabela 5.3-Intervalo de dose utilizada para as lamas primárias.....	36
Tabela 5.4-Intervalo de dosagem utilizado para as lamas biológicas.	36
Tabela 5.5- Volumes de lamas, insolúveis e as respetivas diluições utilizadas no ensaio.	38
Tabela 5.6- Volume de insolúveis da cal doseados e a sua conversão para mg CaCO_3/L e mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{L}$	40
Tabela 6.1-Caracterização dos insolúveis da cal.	49
Tabela 6.2-Caracterização das lamas digeridas da ETAR de Castelo Branco.....	50
Tabela 6.3-Caracterização das lamas digeridas da ETAR de Castelo Branco.....	52
Tabela 6.4-Caracterização das lamas primárias da ETAR de Castelo Branco utilizadas na fase 2.....	53
Tabela 6.5- Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas primárias condicionadas com cal comercial.	55
Tabela 6.6- Síntese dos resultados obtidos na fase 2 para as lamas primárias.....	57
Tabela 6.7-Caracterização das lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco utilizadas na fase 2.....	57
Tabela 6.8- Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com cal comercial.	58
Tabela 6.9- Síntese dos resultados obtidos na fase 2 para as lamas biológicas.	59
Tabela 6.10- Caracterização das lamas primárias da ETAR de Castelo Branco utilizadas na fase 3..	59

Tabela 6.11-Velocidades de sedimentação dos ensaios sedimentação com lamas primárias condicionadas com insolúveis da cal.	62
Tabela 6.12- Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas primárias condicionadas com insolúveis da cal.	63
Tabela 6.13-Síntese dos resultados obtidos na fase 3 com doseamento de insolúveis da cal.	66
Tabela 6.14-Velocidades de sedimentação dos ensaios sedimentação com lamas primárias condicionadas com cal comercial.	68
Tabela 6.15- Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas primárias condicionadas com cal comercial.	69
Tabela 6.16-Síntese dos resultados obtidos na fase 3 com doseamento de cal comercial.....	72
Tabela 6.17-Characterização das lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco utilizadas na fase 4..	72
Tabela 6.18-Velocidades de sedimentação dos ensaios sedimentação com lamas biológicas condicionadas com insolúveis da cal.	75
Tabela 6.19-Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com insolúveis da cal.....	76
Tabela 6.20-Síntese dos resultados obtidos na fase 4 com doseamento de insolúveis da cal.	79
Tabela 6.21-Velocidades de sedimentação dos ensaios sedimentação com lamas biológicas condicionadas com cal comercial.....	81
Tabela 6.22-Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com cal comercial.	82
Tabela 6.23-Síntese dos resultados obtidos na fase 4 com doseamento de cal comercial.....	85
Tabela 0.1Volume da solução padrão de acordo com a concentração de fósforo.	104

Índice de Figuras

Figura 2.1-Distribuição de água nas lamas	4
Figura 2.2-Zonas de Sedimentação ao longo de uma suspensão	23
Figura 4.1-Vista aérea da ETA da Asseiceira.....	27
Figura 4.2-Vista aérea da ETAR de Castelo Branco	28
Figura 5.1- Aparelho Jar-test utilizado nos ensaios.....	31
Figura 5.2- Ensaio de sedimentação com insolúveis de cal.	32
Figura 5.3-Ensaio de sedimentação.	33
Figura 5.4-Cal comercial utilizada	34
Figura 5.5- Jar-test com lamas e cal comercial.	35
Figura 5.6- Ensaio de sedimentação com lamas biológicas (a) e lamas primárias (b).	36
Figura 5.7- Insolúveis da cal retidos na proveta após doseamento.....	38
Figura 5.8-Ensaio de sedimentação com os volumes 100, 90, 80, 70, 60 de insolúveis da cal, após a recolha do sobrenadante.....	39
Figura 5.9-Ensaio de sedimentação com os volumes 40, 30, 20, 10 de insolúveis da cal.	39
Figura 5.10-Quantidade máxima (a) e mínima (b) de cal comercial utilizada.....	41
Figura 5.11- Ensaio de sedimentação com cal comercial após colheita do sobrenadante.....	41
Figura 5.12-Ensaio de sedimentação com lamas biológicas.....	42
Figura 5.13-Ensaio de sedimentação de lamas biológicas com os volumes 100, 90, 80, 70, 60 de insolúveis da cal.	43
Figura 5.14-Ensaio de sedimentação de lamas biológicas com os volumes 50, 40, 30, 20 e 10 de insolúveis da cal, após remoção do sobrenadante.....	43
Figura 5.15-Diluição da cal em balões volumétricos de 100mL com água destilada. Doses correspondentes a 100, 90, 80, 70, 60 mL de insolúveis de cal.....	44
Figura 5.16-Diluição da cal em balões volumétricos de 100mL com água destilada. Doses correspondentes a 50, 40, 30, 20, 10 mL de insolúveis de cal.....	45
Figura 5.17- Solução que ficou retida no balão após doseamento no Jar-test.....	45
Figura 5.18- Ensaio de sedimentação de lamas biológicas com as doses de cal correspondentes aos volumes de 100, 90, 80, 70 e 60 mL de insolúveis da cal.	46
Figura 5.19-Ensaio de sedimentação de lamas biológicas com as doses de cal correspondentes aos volumes de 50, 40, 30, 20 e 10mL de insolúveis da cal.	46

Figura 6.1- Ensaio de sedimentação com os insolúveis de cal.	49
Figura 6.2- Resultado do ensaio de sedimentação com as lamas digeridas da ETAR de Castelo Branco.	50
Figura 6.3- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 10% do seu peso em cal comercial.	50
Figura 6.4- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 15% do seu peso em cal comercial.	50
Figura 6.5- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 20% do seu peso em cal comercial.	51
Figura 6.6- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 25% do seu peso em cal comercial.	51
Figura 6.7- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 30% do seu peso em cal comercial.	51
Figura 6.8- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 15% do seu peso em cal comercial.	52
Figura 6.9- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 10% do seu peso em cal comercial.	52
Figura 6.10- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 20% do seu peso em cal comercial.	52
Figura 6.11- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 25% do seu peso em cal comercial.	52
Figura 6.12- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 30% do seu peso em cal comercial.	53
Figura 6.13- Curva de sedimentação das lamas primárias da ETAR de Castelo Branco.	53
Figura 6.14- Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 15% do seu peso em cal comercial.	54
Figura 6.15- Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 10% do seu peso em cal comercial.	54
Figura 6.16- Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 25% do seu peso em cal comercial.	54
Figura 6.17- Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 20% do seu peso em cal comercial.	54
Figura 6.18- Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 30% do seu peso em cal comercial.	54
Figura 6.19- Influência da cal comercial no pH do sobrenadante.	55
Figura 6.20- Influência da cal comercial na remoção de CQO do sobrenadante.	56

Figura 6.21-Influência da cal comercial na remoção de Pt do sobrenadante.	56
Figura 6.22-Curva de sedimentação das lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco	57
Figura 6.23- Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 10% do seu peso em cal comercial.	58
Figura 6.24- Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 15% do seu peso em cal comercial.	58
Figura 6.25- Curva de sedimentação das lamas primárias da ETAR de Castelo Branco	59
Figura 6.26- Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 100ml de insolúveis da cal.....	60
Figura 6.27-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 90ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.....	60
Figura 6.28-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 80ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.....	60
Figura 6.29-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 70ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.....	60
Figura 6.30-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 60ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.....	61
Figura 6.31-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 50ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.....	61
Figura 6.32-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 40ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.....	61
Figura 6.33-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 30ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.....	61
Figura 6.34-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 20ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.....	61
Figura 6.35-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 10ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.....	61
Figura 6.36-Influência dos insolúveis da cal no pH do sobrenadante.	63
Figura 6.37-Influência dos insolúveis da cal nos SST do sobrenadante.	64
Figura 6.38-Influência dos insolúveis da cal nos SSV do sobrenadante.	64
Figura 6.39-Influência dos insolúveis da cal na CQO do sobrenadante.....	64
Figura 6.40-Influência dos insolúveis da cal no Pt do sobrenadante.....	65
Figura 6.41-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 103,59 mg/L de cal comercial.....	66

Figura 6.42-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 93,23 mg/L de cal comercial.....	66
Figura 6.43-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 82,87 mg/L de cal comercial.....	67
Figura 6.44-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 72,51 mg/L de cal comercial.....	67
Figura 6.45-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 62,16 mg/L de cal comercial.....	67
Figura 6.46-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 51,80 mg/L de cal comercial.....	67
Figura 6.47-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 31,08 mg/L de cal comercial.....	67
Figura 6.48-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 41,44 mg/L de cal comercial.....	67
Figura 6.49-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 20,72 mg/L de cal comercial.....	68
Figura 6.50-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 10,36 mg/L de cal comercial.....	68
Figura 6.51-Influência da cal comercial no pH do sobrenadante.....	70
Figura 6.52-Influência da cal comercial nos SST do sobrenadante.	70
Figura 6.53-Influência da cal comercial nos SSV do sobrenadante.	70
Figura 6.54-Influência da cal comercial na CQO do sobrenadante.	71
Figura 6.55-Influência da cal comercial no Pt do sobrenadante.....	71
Figura 6.56- Curva de sedimentação das lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco.	73
Figura 6.57-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 100ml de insolúveis da cal.....	73
Figura 6.58-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 90ml de insolúveis da cal.	73
Figura 6.59-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 80ml de insolúveis da cal.	73
Figura 6.60-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 70ml de insolúveis da cal.	73
Figura 6.61-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 60ml de insolúveis da cal.	74

Figura 6.62-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 50ml de insolúveis da cal.	74
Figura 6.63-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 40ml de insolúveis da cal.	74
Figura 6.64-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 60ml de insolúveis da cal.	74
Figura 6.65-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 20ml de insolúveis da cal.	74
Figura 6.66-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 10ml de insolúveis da cal.	74
Figura 6.67- Influência dos insolúveis da cal no pH do sobrenadante.	76
Figura 6.68-Influência dos insolúveis da cal nos SST do sobrenadante.	77
Figura 6.69-Influência dos insolúveis da cal nos SSV do sobrenadante.	77
Figura 6.70-Influência dos insolúveis da cal na CQO do sobrenadante.	77
Figura 6.71-Influência dos insolúveis da cal no Pt do sobrenadante.	78
Figura 6.72-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 103,59 mg/L de cal comercial.	79
Figura 6.73-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 93,23 mg/L de cal comercial.	79
Figura 6.74-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 82,87 mg/L de cal comercial.	80
Figura 6.75-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 75,51 mg/L de cal comercial.	80
Figura 6.76-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 51,80 mg/L de cal comercial.	80
Figura 6.77--Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 62,16 mg/L de cal comercial.	80
Figura 6.78-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 41,44 mg/L de cal comercial.	80
Figura 6.79-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 31,08 mg/L de cal comercial.	80
Figura 6.80-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 20,72 mg/L de cal comercial.	81
Figura 6.81-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 10,36 mg/L de cal comercial.	81

Figura 6.82-Influência da cal comercial no pH do sobrenadante.....	82
Figura 6.83-Influência da cal comercial nos SST do sobrenadante.	83
Figura 6.84-Influência da cal comercial nos SSV do sobrenadante.	83
Figura 6.85-Influência da cal comercial na CQO do sobrenadante.....	83
Figura 6.86-Influência da cal comercial no Pt do sobrenadante.....	84
Figura 6.87-Influência dos coagulantes em estudo na velocidade de sedimentação das lamas primárias.	85
Figura 6.88-Influência dos coagulantes em estudo na velocidade de sedimentação das lamas biológicas.	86
Figura 6.89-Influência dos coagulantes em estudo na remoção de SST do sobrenadante das várias lamas analisadas.....	86
Figura 6.90-Influência dos coagulantes em estudo na remoção de SSV do sobrenadante das várias lamas analisadas.....	86
Figura 6.91-Influência dos coagulantes em estudo na remoção de Pt do sobrenadante das várias lamas analisadas	87
Figura 6.92-Influência dos coagulantes em estudo na remoção da CQO do sobrenadante das várias lamas analisadas.....	87

Lista de Abreviaturas

CQO – Carência Química de Oxigênio

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETAR – Estação de Tratamento de Água Residual

MS – Matéria seca

Pt – Fósforo total

Nt- Azoto total

SST – Sólidos Suspensos Totais

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis

1. Introdução

1.1. Enquadramento Geral

A água é um bem essencial à vida devendo garantir-se que a sua qualidade permita que possa ser consumida em ótimas condições. Para que aquelas condições ótimas sejam atingidas e depois mantidas, a água é captada e tratada em estações de tratamento de água (ETA) e distribuída por entidades gestoras (camaras municipais, empresas privadas, etc.) até chegar ao consumidor final.

Do tratamento destas águas decorrem, inevitavelmente, subprodutos, como é o caso das lamas e dos insolúveis de cal (quando se utiliza a cal como reagente). Face às suas características qualitativas (presença de inertes removidos da água e de substâncias químicas associadas aos reagentes químicos doseados), o seu destino final é normalmente a deposição em aterro sanitário (APA, 2015).

A água distribuída é utilizada e recolhida a partir de habitações, indústrias, espaços comerciais ou espaços públicos pela rede e saneamento, passando a designar-se água residual. A água residual é tratada em estações de tratamento de água residual (ETAR) e posteriormente descarregada nos meios recetores.

A descarga destas águas é regulada através do Decreto-Lei n.º 236/98 de 1 de Agosto, 1998, que impõe os limites para diversos parâmetros físicos químicos e biológicos. Por isso, para obedecer a estes critérios, a água residual tem que ser tratada em instalações dedicadas, que incluem um conjunto de operações e processos que visam remover os poluentes, nomeadamente carbono.

No tratamento das águas residuais, são gerados subprodutos que incluem areias, gradados, escumas e lamas. Destes subprodutos, as lamas são as que ocupam maior volume e a sua gestão é muito complexa fazendo do seu tratamento, e deposição final um dos maiores problemas na área do tratamento das águas residuais (Metcalf & Eddy, 2014).

Apesar das lamas representarem 1 a 2% do volume total de água residual tratada, a sua gestão é muito complexa e tem um custo que representa entre 20 a 60% do custo total de operação da ETAR (Andreoli et al., 2007) (Neo Water Treatment, 2018). O seu destino final em Portugal e na Europa é principalmente a valorização agrícola, que é regulada pela Diretiva n.º 86/278/CEE e por legislação nacional (Decreto-Lei n.º 276/2009) (APA, 2015).

1.2. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o estudo da valorização de insolúveis da cal provenientes do tratamento da água para abastecimento público, no espessamento de lamas de ETAR.

Para a prossecução deste trabalho foram utilizados insolúveis da cal provenientes da ETA da Asseiceira e lamas provenientes da ETAR de Castelo Branco, as quais foram utilizadas em ensaios de sedimentação previamente condicionadas com os insolúveis.

Foram igualmente efetuados ensaios de sedimentação com lamas da ETAR de Castelo Branco condicionadas com cal hidratada para comparação da sua eficiência face aos insolúveis da cal.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Produção de lamas

No tratamento de águas residuais, as lamas são normalmente classificadas de acordo com a etapa de tratamento da fase líquida onde são geradas, isto é, lamas primárias, quando provêm da operação de decantação primária e lamas secundárias ou biológicas, quando provêm de processos biológicos.

As lamas primárias espessam graviticamente com relativa facilidade, quer nos próprios tanques de decantação quer nos espessadores gravíticos e são, por isso, mais fáceis de desidratar do que as lamas biológicas. (Santos, 2012). A operação de decantação primária garante, normalmente, remoções de 50 a 70 % de SST e 25 a 40 % de CBO₅. A presença de matéria orgânica faz com que as lamas primárias se decomponham rapidamente quando armazenadas, gerando odores desagradáveis (Metcalf & Eddy, 2014).

A concentração de sólidos varia normalmente entre 2 e 7% de matéria seca (MS) e, por outro lado, são lamas que na operação de desidratação, permitem obter siccidades elevadas recorrendo a quantidades reduzidas de polieletrólito, quando comparadas com as lamas biológicas ou químicas (Pinto, 2019). Estas lamas são habitualmente cinzentas e viscosas e, podem ser facilmente digeridas sob condições adequadas de operação (Metcalf & Eddy, 2014).

A composição das lamas biológicas varia com a composição das águas de que provêm e da tecnologia de tratamento a que foram sujeitas. Da sua constituição fazem parte substâncias orgânicas e minerais de natureza diversa e poderão estar presentes, em maior ou menor quantidade, diferentes microrganismos, alguns dos quais patogénicos (Morgado Cunha, 2007).

A concentração de sólidos depende do processo biológico e varia num intervalo entre 0,4 a 1,2% de MS (Metcalf & Eddy, 2014). A origem da água residual, o tipo de processo e o local de onde são retiradas, a partir do reator biológico ou do decantador secundário, condiciona a concentração da lama (Pinto, 2019).

As lamas biológicas geralmente têm uma cor acastanhada e um odor a terra molhada. Se a cor for mais escura a lama pode estar a entrar no estado séptico e apresenta um odor a putrefação. Caso contrário, se a cor for mais clara que o normal, pode ter havido falta de arejamento no reator o que leva a que a lama sedimente mais lentamente (Metcalf & Eddy, 2014).

2.2. Tratamento de lamas

O tratamento de lamas tem como principal objetivo reduzir o seu volume e a fração orgânica, para posteriormente serem encaminhadas a destino final. As operações e processos normalmente associados ao tratamento de lamas incluem o espessamento, digestão anaeróbia e a desidratação (Pinto, 2019).

A gestão e tratamento de lamas, além de ter custos elevados, é complexo, e se não for bem efetuado pode não só aumentar os custos associados, mas também ter consequências ambientais e sanitárias (Andreoli et al., 2007) (Pinto, 2019). Estes custos são significativamente afetados pelo volume das lamas, ou seja, pelo seu teor de água ou concentração de sólidos, pelo que o espessamento e a desidratação são operações muito relevantes no processamento das lamas e têm um impacto significativo. De maneira a aumentar a eficiência de remoção da água das lamas durante as operações de espessamento e desidratação efetua-se o condicionamento (Ginisty et al, 2012).

A presença de água nas lamas ocorre em quatro formas distintas (Figura 2.1): água livre, água intersticial, água superficial e água de hidratação (Vesilind et al., 1991)

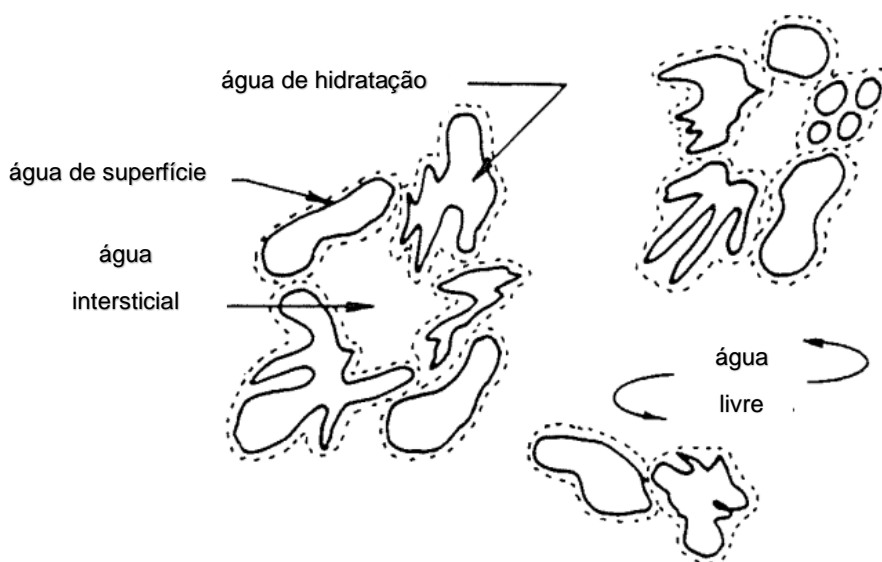


Figura 2.1-Distribuição de água nas lamas (adaptado de Vesilind et al., 1991)

A água livre é a água que não está associada às partículas e não é influenciada, nem pelos sólidos em suspensão nem por fenómenos de capilaridade; a intersticial está aprisionada entre partículas de um floco e dentro das células podendo transformar-se em água livre se houver destruição dos flocos ou das células através de equipamentos de desidratação; a superficial é a mais controversa podendo ser confundida com a intersticial, mas caracteriza-se por ser água retida à superfície das partículas por adsorção e adesão; a de hidratação é considerada a água que está quimicamente associada às partículas e que só pode ser removida com recurso a energia térmica (Pinto, 2019) (Vesilind et al., 1991).

A água livre é considerada a fração de maior importância, pois é a fração mais facilmente removida e que pode ser removida na totalidade por desidratação mecânica (Pinto, 2019). Com condicionamento prévio para além da fração livre também pode ser removida parte da água intersticial (Metcalf & Eddy, 2014).

2.2.1.Espessamento

O espessamento é uma operação utilizada para aumentar a concentração de sólidos das lamas através da remoção de uma porção da fração líquida, reduzindo assim o seu volume (Metcalf & Eddy, 2014). O espessamento de lamas reduz os custos associados ao seu armazenamento, processamento, transporte e destino final (EPA, 2003). Ao aumentar a concentração de sólidos de 1 para 2% reduz-se para metade o volume de lamas (Metcalf & Eddy, 2014).

De acordo com Silva (2015), o espessamento para além de aumentar a concentração de sólidos e diminuir o seu volume através da remoção de uma fração da água, permite que a lama espessada permaneça num estado fluido capaz de ser bombeada sem grande dificuldade. A redução do volume por espessamento tem o objetivo de aumentar a eficiência e diminuir os custos das operações e processos de tratamento de lamas posteriores.

Os tipos de espessamento mais comuns incluem o espessamento gravítico e a flotação por ar dissolvido (DAF). Existem, no entanto, outras alternativas que recorrem a equipamentos mecânicos como centrífugas, mesas de espessamento ou tambores rotativos.

A escolha do método de espessamento a utilizar deve considerar fatores como a concentração de sólidos e o caudal de lamas a espessar, concentração de sólidos e caudal de lamas espessadas, concentração de sólidos e caudal de escorrências e necessidade e custo de reagentes caso sejam necessários (USEPA, 1979).

2.2.1.1. Espessamento gravítico

Considerada uma das operações mais comuns, o espessamento gravítico é realizado num tanque idêntico a um tanque de sedimentação convencional, normalmente de forma circular e com uma ponte raspadora. Este sistema atua de forma simples, promovendo a separação das duas frações (líquida e sólida) através das operações de sedimentação e decantação, ou seja, a ação da gravidade permite a deposição da lama espessada na base do tanque enquanto a água é recolhida na parte superior do mesmo. Alguns espessadores estão equipados com um sistema de agitação lenta das lamas que promove a floculação e coagulação e, consequentemente a melhoria do processo de decantação acelerando o espessamento (Silva, 2015).

O espessamento gravítico é mais eficaz no tratamento de lamas primárias. O dimensionamento destes órgãos é normalmente efetuado com base na carga de sólidos afluente e na carga hidráulica. Segundo Metcalf & Eddy (2014), elevadas cargas hidráulicas podem causar baixas eficiências de remoção, enquanto que baixas cargas hidráulicas podem causar condições sépticas, bem como levar à flotação das lamas. De modo a procurar garantir uma carga hidráulica mais ou menos constante, pode-se adicionar água de diluição (efluente final) às lamas que são encaminhadas para o espessador. O efluente final que se adiciona às lamas vai permitir manter as condições aeróbias, bem como ajudar

na remoção de compostos orgânicos e inorgânicos solúveis (Metcalf & Eddy, 2014). Segundo Rasquilha (2010), para além da carga hidráulica, o desempenho dos espessadores gravíticos também depende de fatores como o tipo de lamas afluente, a sua temperatura, a profundidade do manto de lamas e do tempo de retenção hidráulico.

2.2.1.2. Flotação por ar dissolvido

A flotação por ar dissolvido pode ser usada quando as partículas sólidas têm uma velocidade de sedimentação reduzida. (European Commission, 2001). Neste processo, o ar é mantido a uma pressão elevada numa solução onde permanece dissolvido. Quando a pressão é reduzida, o ar é libertado para a água formando pequenas bolhas. A libertação dessas bolhas é responsável por arrastar as partículas sólidas para a superfície, formando as lamas (Andreoli et al., 2007) (Qasim & Zhu, 2018).

O espessamento por flotação é mais eficaz quando aplicado a lamas provenientes de tratamentos biológicos por biomassa em suspensão (lamas ativadas), pelo facto destas lamas apresentarem uma densidade reduzida. No entanto também podem ser utilizados para espessar lamas primárias ou mistas (Rasquilha, 2010). Esta operação também é utilizada em ETAR em que se pratica remoção biológica de fósforo. Nestas ETAR, a lama deverá ser mantida em condições aeróbias para evitar que o fósforo seja libertado, e volte para a cabeça da estação como fósforo dissolvido através das escurências (Andreoli et al., 2007).

De modo a melhorar o desempenho da operação de flotação podem ser utilizados polímeros. A utilização de polímeros como auxiliares de flotação permite aumentar a remoção de sólidos do efluente de 85% para 98 a 99%, reduzindo desta forma a sua recirculação. A quantidades de polímero que deve ser utilizada varia entre 2 e 5 kg de polímero por tonelada de matéria seca de lamas (Metcalf & Eddy, 2014).

Segundo os autores Metcalf & Eddy (2014) e Turovskiy & Mathai (2006), os fatores que afetam o desempenho da flotação por ar dissolvido incluem: razão ar-sólidos, características da lamas (em particular o SVI), a carga de sólidos e o uso de polímero.

A razão ar-sólidos é talvez o fator mais importante que afeta o desempenho da flotação por ar dissolvido. A razão a que a eficiência da flotação é máxima varia entre os 2 e os 4 % (Turovskiy & Mathai, 2006) (Metcalf & Eddy, 2014). O SVI também é um fator importante dado que pode afetar significativamente o desempenho da flotação. De acordo com Metcalf & Eddy (2014) e Turovskiy & Mathai (2006), quando o SVI é inferior a 200, consegue-se uma melhor eficiência de espessamento (4%), utilizando doses normais de polímero. Se o SVI for mais elevado, a concentração de sólidos flotados é afetada negativamente, fazendo com seja necessária uma maior dose de polímero.

2.2.1.3. Centrifugação

O espessamento por centrifugação consiste na aceleração da sedimentação através da utilização da força centrífuga. Num espessador gravítico, os sólidos sedimentam através da ação da gravidade. Numa centrífuga, é aplicada uma força 500 a 3000 vezes superior à força da gravidade, pelo que uma centrífuga age como um espessador gravítico altamente eficaz. A lama é alimentada por meio de um tubo de alimentação e um distribuidor num rotor constituído por um corpo e um parafuso transportador. O corpo e o parafuso giram a uma velocidade muito alta (o parafuso gira um pouco mais rápido que o corpo). O parafuso transporta os sólidos para a parte cónica do corpo e o filtrado é descarregado na outra extremidade (Turovskiy & Mathai, 2006)

As centrífugas podem ser utilizadas quer para espessar quer para desidratar lamas. Na operação de espessamento, as centrífugas são normalmente utilizadas para espessar as lamas biológicas provenientes de processos de lamas ativadas. As lamas primárias raramente são espessadas por centrífugas porque, geralmente, contém material abrasivo que pode ser prejudicial para uma centrífuga. A utilização de polímeros pode melhorar a eficiência na captura de sólidos permitindo a obtenção de valores superiores a 90%. Além de ser muito eficaz para o espessamento das lamas biológicas, as centrífugas têm a vantagem adicional de exigir menos espaço, terem menor potencial para emitir odores e serem menos exigentes no que se refere à limpeza, devido a ser um processo fechado. No entanto o custo de capital e de manutenção e os custos de energia podem ser substanciais. Consequentemente, a sua utilização é geralmente limitada a ETAR de grandes dimensões (Turovskiy & Mathai, 2006).

2.2.1.4. Mesas de espessamento

A mesa de espessamento consiste numa tela que se move sobre rolos impulsionada por uma unidade de acionamento de velocidade variável. A lama é condicionada e enviada para um tanque de floculação, onde é posteriormente distribuída uniformemente para a tela. A água é drenada através do tecido da tela e a lama concentrada é transportada até à extremidade de descarga da mesa (Metcalf & Eddy, 2014).

A mesa de espessamento pode ser usada para espessar lamas com concentrações iniciais tão baixas quanto 0,4% e podem ser alcançadas eficiências na captura de sólidos superiores a 95%. Outras vantagens da mesa de espessamento incluem o custo de capital relativamente moderado e consumo de energia relativamente baixo. No entanto, a mesa de espessamento também é dependente do polímero, pelo que é necessário a adição de 1,5 a 6 g de polímero por kg de matéria seca. As desvantagens incluem o potencial para libertação de odores e o facto de exigir atenção por parte dos operadores para otimizar a alimentação de polímero e as velocidades da tela. Normalmente também é necessário um edifício para proteger a mesa de espessamento das intempéries. Este equipamento tem sido utilizado para o espessamento de lamas biológicas, lamas aerobiamente e anaerobiamente

digeridas, e algumas lamas resultantes do tratamento de águas residuais industriais (Turovskiy & Mathai, 2006).

As principais vantagens e desvantagens das várias operações de espessamento encontram-se resumidas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Vantagens e desvantagens dos métodos de espessamento (adaptado de Turovskiy & Mathai, 2006)

<i>Operação</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Espessamento Gravítico</i>	Custos de operação reduzidos	Requer áreas significativas
	Ideal para pequenas instalações	Potencial para libertação de odores
	Não requer condicionantes químicos	Pode ocorrer a flotação de sólidos
	Não requer operação especializada	Concentração de sólidos baixa para lamas biológicas
<i>Flotação por ar dissolvido (DAF)</i>	Melhor desempenho no espessamento de lamas biológicas provenientes de lamas ativadas	Custos de operação elevados
	Requer menos espaço que o espessador gravítico	Não é recomendada para espessamento de lamas primárias
		Requer o doseamento de polímeros
		Não tem capacidade de armazenar lamas
<i>Espessamento por centrifuga</i>	Eficiente em lamas biológicas	Custo de capital elevado
	Produção de odores é limitada	Custo de operação elevado
	Necessidades de espaço mínimas	Requer condicionamento químico para atingir uma elevada taxa de captura de sólidos
		Requer manutenção especializada
<i>Mesa de espessamento</i>	Eficiente para lamas biológicas com baixa concentração de sólidos (0,4% até 6%)	Dependente da adição de polímero
	Elevada taxa de captura de sólidos	Potencial para libertação de odores
	Custo de capital reduzido	Requer edifício próprio
	Custo energético reduzido	Requer atenção moderada na operação

2.2.2. Estabilização

A estabilização é um processo que tem por objetivo a degradação da matéria orgânica, através da conversação dos sólidos biodegradáveis em produtos finais não celulares. Este processo também contribui para que ocorra uma redução do número de organismos patogénicos, bem como uma redução da libertação de odores das lamas (Victor, 2010). A estabilização pode ser biológica ou química.

A estabilização biológica é o processo mais frequentemente utilizado, podendo ser realizada por via anaeróbia ou aeróbia ou ainda por compostagem. A estabilização química é normalmente realizada através da adição de cal viva (óxido de cálcio) ou de cal hidratada (hidróxido de cálcio), sendo normalmente realizada após a desidratação (Metcalf & Eddy, 2014) (Pinto, 2019).

Na Tabela 2.2 são resumidos os principais processos de estabilização.

Tabela 2.2- Descrição dos principais processos de estabilização (adaptado de Metcalf & Eddy, 2014).

Processo	Descrição	Comentários
<i>Estabilização química</i>	Adição de um reagente alcalino, normalmente cal, para manter um pH elevado para promover a inativação dos organismos patogénicos.	A principal vantagem deste processo é uma elevada inativação dos organismos patogénicos. As desvantagem incluem o aumento da massa das lamas pela adição do reagente.
<i>Digestão anaeróbia</i>	Conversão biológica por fermentação da matéria orgânica num reator aquecido para produzir biogás (metano e dióxido de carbono).	O gás metano pode ser usado para gerar calor ou eletricidade. As lamas resultantes deste processo poderão ser utilizadas para valorização agrícola. Custo de investimento elevado
<i>Digestão aeróbia</i>	Conversão biológica da matéria orgânica na presença de oxigénio, normalmente num reator aberto.	É um processo mais fácil de operar que a digestão anaeróbia, mas não produz gás. Sendo um processo aeróbio consome muita energia.

A digestão anaeróbia pode ser efetuada em regime de baixa carga (temperatura não controlada), ou em regime de alta carga (temperatura na faixa mesófila, 30 a 38 °C, ou temperatura na faixa termófila, 50 a 57 °C) (Pinto, 2019) (Metcalf & Eddy, 2014). Em ETAR de média e grande dimensão, opta-se geralmente pela digestão anaeróbia de alta carga que permite a valorização de biogás, com produção de calor e energia elétrica, permitindo atenuar os custos energéticos da estação.

O biogás é um biocombustível gasoso constituído maioritariamente por metano (CH₄) dióxido de carbono (CO₂), contendo igualmente, vestígios de compostos, tais como ácido sulfídrico (H₂S), oxigénio (O₂), amoníaco (NH₃) e siloxanos. Globalmente, é constituído por 40 a 70% de CH₄, 30 a 60% de CO₂

(Pires, 2015). O potencial calorífico do biogás depende do conteúdo de metano, variando entre 21,300 e 23,400 kJ · N/m³ (SUEZ Degremont, 2019).

O biogás pode ser armazenado num gasómetro ou no próprio digestor e é geralmente limpo e purificado antes de ser utilizado para produção de energia pois contém impurezas como o H₂S que danificam os equipamentos de cogeração (Metcalf & Eddy, 2014).

2.2.3.Desidratação

A desidratação é uma operação que tem por objetivo a redução de volume de lama. Desidratar uma lama espessada com 4% de concentração em sólidos para 20%, significa reduzir o volume para 1/5 do inicial (Santos, 2011).

Segundo Pinto (2019), a desidratação é exigida previamente a processos como a secagem térmica e, ou a incineração, para aumentar o potencial calorífico, e viabiliza processos como a compostagem e a deposição em aterro sanitário, reduzindo também a produção de lixiviados no aterro.

A escolha do sistema de desidratação é determinada pelo tipo de lamas a serem desidratadas, objetivos de qualidade final, destino final das lamas e espaço disponível (Metcalf & Eddy, 2014). As lamas podem ser desidratadas por processos naturais como leitos de secagem, baseado na evaporação e na percolação, ou recorrendo a equipamentos mecânicos como as centrifugas, filtros banda ou filtros prensa, que utilizam energia elétrica.

Segundo Metcalf & Eddy (2014), os métodos naturais são mais utilizados em pequenas instalações onde a produção de lamas é reduzida e há espaço disponível. Para ETAR de maiores dimensões ou que estejam limitadas em termos de espaço, os processos mecânicos são mais adequados.

A desidratação natural não necessita de nenhum condicionamento prévio, ao contrário da desidratação mecânica em que é imprescindível o condicionamento químico prévio para aumentar a eficiência do processo (Pinto, 2019).

2.2.3.1. Leitos de secagem

De acordo com Ramos (2011), uma das técnicas mais simples para a desidratação de lamas de depuração são os leitos de secagem ao ar livre. Esta técnica é usada principalmente em pequenas ETAR sempre que haja área suficiente disponível a custos acessíveis e o clima local seja favorável para a operação dos leitos durante todo o ano. Esta técnica pode ser menos eficiente em climas frios.

Os leitos de secagem são constituídos por uma área de areia e cascalho com cerca de 0,3 m de espessura onde as lamas são espalhadas. A água é drenada e enviada para a cabeça da estação enquanto as lamas secam através da radiação solar. Este processo permite obter um teor de matéria

seca de 40 a 50% em alguns países, dependendo da duração da secagem. Este nível é reduzido para 10% nos países nórdicos (Ramos, 2011).

As principais vantagens dos leitos de secagem são o seu baixo custo de investimento, baixo consumo energético, consumo baixo ou nulo de químicos, fácil operação, pouca sensibilidade à variação da qualidade das lamas, e a obtenção de um teor de sólidos mais elevado que a maior parte dos processos mecânicos. As desvantagens incluem uma grande exigência de espaço, a necessidade das lamas estarem estabilizadas, serem suscetíveis aos efeitos climáticos, potencial para libertação de odores e o facto de a remoção das lamas desidratadas ser um trabalho intensivo (Turovskiy & Mathai, 2006).

2.2.3.2. Centrifugas

A centrífuga é, essencialmente, um equipamento de sedimentação no qual a separação sólido-líquido é reforçada pelo uso da força centrífuga. Isto é conseguido através da rotação do líquido a altas velocidades de modo a submeter a lama a uma força centrífuga cuja resultante é superior à força gravitacional de um corpo em repouso (Ramos, 2011).

São equipamentos de operação relativamente simples, compactos, que não produzem odores e que geram lamas com elevadas concentrações de sólidos (20-30%). Por outro lado são equipamentos que têm um consumo energético elevado, requerem manutenção periódica e especializada, muito sensíveis à presença de areia ou de sólidos de maior dimensão que possam estar presentes nas lamas, as escorrências apresentam quantidades de SST relativamente elevadas e podem produzir algum ruído e vibrações (Metcalf & Eddy, 2014) (Qasim & Zhu, 2018).

Os parâmetros mais importantes na operação das centrifugas incluem o caudal de alimentação de lamas, velocidade de funcionamento, características físico-químicas da lama (tamanho, forma, densidade, temperatura, viscosidade), polímero usado e altura de líquido na câmara cilíndrica (Qasim & Zhu, 2018)

2.2.3.3. Filtros banda

Os filtros banda são equipamentos de alimentação contínua que se baseiam no princípio da filtração, através de drenagem gravítica e pressão mecânica, para desidratar lamas. Foram introduzidos nos anos 70 e são um dos principais equipamentos de desidratação de lamas (Metcalf & Eddy, 2014).

Estes equipamentos são constituídos por três zonas: zona de drenagem por gravidade, onde a água é removida por gravidade através da tela ficando uma lama mais concentrada; zona de baixa pressão onde a lama é submetida a baixa pressão através de duas telas que a espremem; e zona de alta pressão onde a pressão das telas sobre a lama vai aumentando à medida que vai a tela vai passando pelos cilindros. A lama desidratada é removida da tela, com recurso a uma lamina que raspa a tela (Metcalf & Eddy, 2014). A concentração de sólidos das lamas desidratadas variam entre 15 e 35%, e a retenção de sólidos entre 95 e 98% (Qasim & Zhu, 2018).

As principais vantagens dos filtros banda incluem: fácil manutenção, baixo consumo energético e elevado teor de retenção de sólidos. As principais desvantagens estão relacionadas com a necessidade de um grande volume de água de lavagem, são sensíveis a objetos afiados que possam estar nas lamas e requerem a adição de polímeros para controlar os odores das lamas (Qasim & Zhu, 2018).

2.2.3.4. Filtros prensa

O filtro prensa é um equipamento de separação sólido-líquido que funciona de acordo com o princípio de filtração com recurso à aplicação de altas pressões (SUEZ degremon, 2019). Os dois tipos mais comuns de filtros prensa utilizados são os de volume fixo e os de volume variável ou de diafragma (Metcalf & Eddy, 2014).

Os filtros prensa de volume fixo consistem em blocos de placas verticais revestidos por telas filtrantes entre as quais a lama é injetada sob pressão. A diferença entre os dois tipos de filtros é que os de volume variável têm uma membrana extra nas placas. Esta membrana é capaz de aplicar uma pressão uniforme no volume de lamas, garantindo uma maior homogeneidade (SUEZ degremon, 2019).

De acordo com Turovskiy & Mathai (2006) e Qasim & Zhu (2018), os filtros prensa permitem obter valores de siccidade bastante elevada, entre os 20 e os 55%. Outra vantagem decorre de uma elevada taxa de retenção de sólidos, produzindo escorrências de boa qualidade. Por outro lado, as desvantagens destes equipamentos incluem o elevado custo de investimento e de operação e manutenção incluindo um elevado consumo de polímero.

A Tabela 2.3 resume as principais vantagens e desvantagens dos principais métodos de desidratação de lamas.

Tabela 2.3- Vantagens e desvantagens dos principais métodos de desidratação de lamas (adaptado de Metcalf & Eddy, 2014)

<i>Método</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Leitos de secagem</i>	Custo de capital reduzido	Elevada exigência de espaço
	Custo energético reduzido	Potencial risco de odores
	Consumo baixo ou nulo de químicos	Suscetível aos efeitos climáticos
	Concentração de sólidos elevada	A remoção de lamas é um trabalho intensivo
<i>Centrifugas</i>	Fácil instalação	Potenciais problemas de manutenção
	Produção de lamas com siccidade média-alta	Necessidade de manutenção especializada
	Odor reduzido	Concentração potencialmente elevada de sólidos suspensos nas escorrências
	Fácil operação	Elevadas necessidades energéticas
		Sensível a sólidos de maior dimensão e areia
<i>Filtro banda</i>	Consumo energético baixo	Necessidade elevada de água de lavagem
	Custos de investimento e operação reduzidos	Ciclo de vida curto comparativamente a outros equipamentos de filtração
	Fácil operação	Operação automática não recomendada
	Produce lamas com uma concentração de sólidos media-alta	Sensível às características da lama
		Sensível a objetos afiados que possam estar nas lamas
<i>Filtro prensa</i>	Permitem obter elevados valores de siccidade	Não permite operação em contínuo
	Baixa concentração de sólidos suspensos nas escorrências	Custos de investimento elevado
	Taxa de retenção de sólidos elevada	Custos de operação e manutenção elevados
	Operação simples	Necessidade de manutenção especializada
		Aumento de sólidos devido ao uso de químicos inorgânicos

2.3. Condicionamento de lamas

O condicionamento de lamas é utilizado para melhorar as características de desidratação das lamas, neutralizando ou destabilizando as forças químicas ou físicas que atuam nas partículas coloidais e/ou nas partículas em suspensão na água. Isto é conseguido através de coagulação seguida de floculação, em que a coagulação destabiliza as partículas, diminuindo a intensidade da força electrostática que as repele, e a floculação permite que as pequenas partículas se agreguem e formem flocos, melhorando assim a eficiência da desidratação ou espessamento das lamas (Andreoli et al., 2007) (Bishop, 1995).

Os processos mais comuns de condicionar lamas são químicos e físicos, sendo os químicos os mais utilizados. Os processos químicos utilizam polímeros inorgânicos, como cal e cloreto férrico, e orgânicos como os polieletrólitos (Metcalf & Eddy, 2014). Os processos físicos incluem condicionamento térmico, condicionamento por congelamento-descongelamento e elutrição (Qasim & Zhu, 2018).

Além de melhorar a separação sólido-líquido das lamas, alguns processos de condicionamento também desinfetam as lamas, controlam os odores, alteram as características dos sólidos das lamas e melhoram a recuperação de sólidos. O condicionamento pode também diminuir ou aumentar a quantidade de sólidos das lamas (Turovskiy & Mathai, 2006).

2.3.1. Fatores que afetam o condicionamento

As lamas provenientes do tratamento de água residual consistem em sólidos orgânicos e inorgânicos de tamanho variado com origem no tratamento primário, secundário ou tratamento químico. Dependendo da sua origem, as lamas têm diferentes características que afetam a sua capacidade de desidratação incluindo (Turovskiy & Mathai, 2006): a origem, a concentração de sólidos, o tamanho e distribuição das partículas, o pH e a alcalinidade, as cargas superficiais, o grau de hidratação e os fatores físicos (armazenamento das lamas, a bombagem, tratamento).

A origem das lamas é um bom indicador da dose de coagulante a ser utilizada. De acordo com Turovskiy & Mathai (2006) e Metcalf & Eddy (2014), as lamas primárias requerem, de um modo geral, doses menores de condicionante que as lamas biológicas. Entre as lamas biológicas, as que têm origem em tratamento por biomassa fixa requerem doses menores do que as provenientes de processos por biomassa em suspensão. Para as lamas digeridas, as doses de condicionante são semelhantes quer para as lamas digeridas por via anaeróbia, quer para as lamas digeridas por via aeróbia. No entanto, segundo o mesmo autor, as necessidades de condicionamento para o mesmo tipo de lamas podem ser diferentes de ETAR para ETAR.

As lamas contêm um grande número de partículas coloidais, que têm grandes áreas superficiais específicas. Se a concentração de sólidos for baixa, as partículas interagem pouco, fazendo com que tenha de ser adicionada uma maior dose de coagulante para conseguir quebrar as cargas elétricas que envolvem as partículas (Turovskiy & Mathai, 2006).

O tamanho das partículas é considerado o fator mais importante que influencia a capacidade de desidratação de uma lama. Para a mesma concentração de sólidos, quanto maior o número de pequenas partículas, maior a relação área/volume, o que se traduz numa maior hidratação, maior resistência à desidratação e maior necessidade de condicionante (Turovskiy & Mathai, 2006) (Bishop, 1995).

Assim, qualquer processo que reduza o tamanho das partículas suspensas na lama vai influenciar negativamente o condicionamento das mesmas. A bombagem de lamas, por exemplo, sujeita o material suspenso nas lamas a forças de deformação que podem resultar na redução do seu tamanho. A agitação e a mistura das lamas com o químico também podem influenciar negativamente a resistência ao cisalhamento das partículas, diminuindo o seu tamanho (Turovskiy & Mathai, 2006) (Bishop, 1995) (Bazzaoui et al., 2011) (Huron et al., 2010)

2.3.2. Condicionamento químico

O condicionamento químico é o método mais utilizado para condicionar lamas. Este condicionamento pode ser visto como uma operação de coagulação e floculação, pois neutraliza as cargas elétricas dos coloides através do uso de polímeros orgânicos ou inorgânicos com cargas opostas. Ao adicionar químicos, o tamanho das partículas aumenta o que faz com que a quantidade de água diminua, melhorando assim a sua capacidade de desidratação (Turovskiy & Mathai, 2006). Normalmente os sólidos presentes nas lamas apresentam carga negativa motivo pelo qual, os reagentes frequentemente utilizados no condicionamento são do tipo catiónico (Metcalf & Eddy, 2014).

O condicionamento químico utiliza químicos inorgânicos e polímeros, sendo os polímeros os mais utilizados. Os condicionantes inorgânicos incluem a cal, o cloreto férrico, sulfato de alumínio, sulfato de ferro e o cloreto de alumínio (Metcalf & Eddy, 2014)

Apesar de os polímeros serem mais utilizados, quando as lamas são difíceis de desidratar e requerem doses maiores de polímeros, os sais de ferro são habitualmente usados. Os polímeros não aumentam a quantidade de sólidos nas lamas, ao contrário dos sais de ferro e da cal que podem aumentar até 30% a quantidade de matéria sólida (Metcalf & Eddy, 2014) (Qasim & Zhu, 2018).

2.3.2.1. Condicionantes inorgânicos

Até a década de 70 os condicionantes químicos mais utilizados para a desidratação de lamas eram os condicionantes inorgânicos como o cloreto férrico, o sulfato de ferro e o cloreto de alumínio, sendo que a sua adição era geralmente seguida de cal (Turovskiy & Mathai, 2006). Atualmente, estes condicionantes são mais utilizados na desidratação por filtros prensa (Andreoli et al., 2007) (Metcalf & Eddy, 2014).

Segundo Qasim & Zhu (2018) e Andreoli et al. (2007), quando os sais de ferro são adicionados às lamas, os sais hidrolisam e formam complexos de ferro com carga positiva que neutralizam as cargas

negativas das partículas o que faz com que se agreguem. Também vão reagir com os bicarbonatos, formando os hidróxidos que causam a floculação.

O uso de cal, em conjunto com os sais de ferro ou de alumínio serve para controlar o pH, reduzindo assim os odores e desinfetando as lamas. Apesar disto, como a cal aumenta o pH gera uma libertação de amónia pelo que deve ser garantida uma ventilação adequada. Outras desvantagens do uso de cal incluem uma diminuição do potencial calorífico da lama e um aumento da quantidade de lamas a transportar a destino final (The Institute of Water Pollution Control, 1981).

A cal é normalmente utilizada na forma de cal viva (CaO) ou cal hidratada (Ca(OH)_2). A cal viva antes de ser utilizada tem de ser misturada com água, para formar a cal hidratada. Esta operação liberta uma quantidade de calor considerável, pelo que requer equipamento e cuidados próprios. A cal hidratada não requer uma mistura com água prévia ao seu uso, pelo que a libertação de calor é mínima, não requerendo cuidados especiais no armazenamento, ao contrário da cal viva que tem de ser armazenada em locais secos para prevenir reações de hidratação. Em instalações que consumam 1-2 toneladas de cal por dia, o uso de cal viva poderá ser mais económico pois a cal hidratada é mais cara. No que diz respeito à utilização do cloreto férrico, este é bastante corrosivo. Como tal, cuidados especiais devem ser tomados quando da operação do reagente, seleção do material para o tanque de armazenamento e para as bombas (Andreoli et al., 2007).

As doses de condicionante a utilizar são normalmente em função na quantidade de MS presente nas lamas, variando as doses de cal e de cloreto férrico entre 7 a 15% e 2 a 6%, respetivamente (Qasim & Zhu, 2018).

2.3.2.2. Condicionantes orgânicos

Os polímeros orgânicos, também denominados de polieletrólitos orgânicos, são solúveis em água e são os condicionantes mais utilizados para condicionar lamas. Estes polímeros, quando se dissociam libertam aniões, deixando para trás grandes cadeiras de moléculas com elevado peso molecular que têm carga positiva. Estas longas cadeias vão flocular com os sólidos suspensos e com os colóides, resultando numa melhor separação sólido- líquido (Metcalf & Eddy, 2014).

O polieletrólito pode ser classificado pela sua carga, pelo seu peso molecular, e pela sua forma (pó, líquida, emulsão ou gel). A melhor maneira de comparar o desempenho dos vários tipos de polieletrólito é através do seu peso molecular e da sua carga (Turovskiy & Mathai, 2006). Os polímeros normalmente utilizados em lamas provenientes do tratamento de água residual são catiónicos e de grande peso molecular (Metcalf & Eddy, 2014).

Os autores Bazzouai et al. (2011) e Vaxelaire & Olivier (2006), testaram vários polímeros com diferentes pesos moleculares e densidades de cargas e concluíram que os polímeros com pesos moleculares inferiores tinham um desempenho pior na desidratação de lamas.

Os polímeros são mais facilmente aplicados na forma líquida pelo que, se a instalação utilizar polímero em pó será necessário equipamento apropriado para preparar a respetiva solução. Os materiais quer do tanque de preparação, quer das bombas devem ser anticorrosivos (Metcalf & Eddy, 2014).

As vantagens dos condicionantes orgânicos sobre os condicionantes inorgânicos incluem (Qasim & Zhu, 2018): não aumentam a quantidade de lama, não diminuem o potencial de combustível do bolo e são mais fáceis e seguros de operar que os químicos inorgânicos.

A quantidade de reagentes necessária é determinada de duas formas, ou em laboratório ou através de pilotos à escala real. Se for em laboratório, existem três testes normalmente utilizados (Metcalf & Eddy, 2014): resistência específica à filtração (SRF), com recurso a um funil de *Buchner*; tempo de sucção capilar (CST); *Jar test*.

O *Jar test* é o método mais fácil e o mais utilizado atualmente. As lamas classificadas como difíceis de desidratar requerem dosagens superiores e não permitem obter siccidades tão elevadas nem escorrências tão clarificadas (Pinto, 2019).

Na Tabela 2.4 resumem-se as faixas de referência para o doseamento de polieletrólito na desidratação de lamas.

Tabela 2.4- Doses características de polímero utilizadas na desidratação de lamas.

Equipamento	Tipo de lamas	Dose de polímero (g/kg MS)	Fonte
Centrifuga	Lamas primarias não digeridas	2,5-5	Metcalf & Eddy, 2014
	Lamas mistas não digeridas	2.5-8	
	Lamas biológicas não digeridas	7,5-15	
	Lamas primárias digeridas anaerobiamente	4-6	
	Lamas mistas digeridas anaerobiamente	7.5-15	
	Lamas biológicas digeridas anaerobiamente	5-9,7	
Filtro banda	Lamas primarias não digeridas	1,5-2,5	Metcalf & Eddy, 2014
	Lamas mistas não digeridas	3-5,5	
	Lamas biológicas não digeridas	5-10	
	Lamas primárias digeridas anaerobiamente	2-5	
	Lamas mistas digeridas anaerobiamente	4-8,5	
	Lamas biológicas digeridas anaerobiamente	4-10	
Filtro prensa	Lamas mistas não digeridas	2-7	Turovskiy & Mathai, 2006

2.3.3. Condicionamento físico

Os processos mais comuns de condicionamento físico de lamas incluem: condicionamento térmico, condicionamento por congelamento-descongelamento e a elutriação (Qasim & Zhu, 2018).

2.3.3.1. Condicionamento térmico

O condicionamento térmico é um processo que tem sido utilizado para condicionar e estabilizar as lamas, mas raramente é usado em novas instalações (Ramos, 2011). Este processo consiste no aquecimento das lamas a 170-220°C, e a uma pressão de 1,2 a 2,5 MPa, durante 15 a 30 minutos. O calor faz com que os sólidos coagulem, alterando a estrutura das partículas e reduzindo a afinidade dos sólidos para com a água, ajudando ainda mais a desidratação (Qasim & Zhu, 2018). A lama é posteriormente espessada num espessador gravítico antes de ser desidratada (Turovskiy & Mathai, 2006).

No condicionamento térmico, ocorre alguma decomposição da matéria orgânica presente nas lamas, dependendo das propriedades das lamas. Da matéria que foi decomposta, 75 a 80% dissolve-se na água que depois será retirada no espessamento e na desidratação, aumentando a concentração de sólidos nas escorrências, que pode atingir valores entre 2000mg/L a 6000mg/L. Este aumento de sólidos pode aumentar a necessidade de tratamento da instalação de 10 a 25% (Turovskiy & Mathai, 2006). Nestas circunstâncias, as escorrências deste processo poderão ter que ser tratadas através da adição de produtos químicos para reduzir as cargas orgânicas.

Segundo Turovskiy & Mathai (2006), em comparação com a adição de químicos, o tratamento térmico apresenta algumas vantagens (exceto no caso das lamas ativadas): permite a obtenção de concentrações de sólidos entre 50 a 60% nas lamas desidratadas com equipamentos de desidratação mecânica após o condicionamento térmico; normalmente não é necessária a adição de químicos; estabilização das lamas e destruição de grande parte dos microrganismos patogênicos; o processo é insensível à variação da composição das lamas; e, o processo é adequado para diversos tipos de lamas que não podem ser estabilizadas biologicamente por causa da presença de materiais tóxicos.

As principais desvantagens incluem: custo de capital elevado, devido à necessidade de se utilizar materiais anticorrosivos nos permutadores de calor e equipamentos para controlar os odores; este processo requer supervisão, operação especializada e um programa de prevenção bem elaborado; o processo produz odores que tem de ser recolhidos e tratados antes de serem libertados para a atmosfera; e o processo produz escorrências com elevadas concentrações de compostos orgânicos, amoníaco, azoto e cor (Turovskiy & Mathai, 2006). De acordo com Metcalf & Eddy (2014) estas desvantagens têm conduzido ao abandono da utilização deste processo, e poucas instalações tem sido contruídas.

A Tabela 2.5 resume as vantagens e desvantagens do condicionamento químico e do condicionamento térmico.

Tabela 2.5- Vantagens e desvantagens de diversos tipos de condicionamento de lamas (adaptado de European Commission, 2001)

<i>Método de condicionamento</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Químico (compostos inorgânicos)</i>	Aumento da coesão das partículas e densidade da lama	Aumento da matéria seca
		Redução do seu conteúdo orgânico
		Processo lento
<i>Químico (compostos orgânicos)</i>	Redução do volume de lama	Preço dos reagentes
	Não altera o potencial agrícola da lama	
	Utiliza menores doses de polímero	
	Fácil de manusear e transportar	
<i>Térmico</i>	Pode-se aplicar a todo o tipo de lamas	Custo de capital elevado
	Processo eficiente e estável	Consumos energéticos elevados
	Estabiliza e desinfeta as lamas	Produção de maus odores
	Reduz o volume de lamas	Escorrências com elevadas cargas orgânicas

2.3.3.2. Condicionamento por congelamento e descongelamento

O método de condicionar lamas por congelamento e descongelamento é um método que melhora a capacidade de desidratação das lamas. Este método utiliza leitos de secagem para condicionar lamas a baixas temperaturas (Turovskiy & Mathai, 2006). Várias bases militares situadas em regiões geladas utilizam este método de condicionamento (Vesilind et al., 1991).

Congelar e logo de seguida descongelar a lama resulta na alteração da estrutura da lama convertendo a água quimicamente ligada na lama a água livre. Isto faz com que a capacidade de desidratação da lama aumente significativamente, permitindo que a lama seja desidratada com uma quantidade menor de condicionante químico ou até mesmo sem o uso do mesmo (Turovskiy & Mathai, 2006).

Quando a temperatura baixa para os 0°C, a água livre da lama começa a congelar formando uma estrutura com grande simetria e regularidade. Como esta estrutura não consegue acomodar outros átomos ou moléculas sem quebrar a estrutura, os sais e praticamente todas os outros solutos na água são rejeitados ficando fora da camada de gelo que se forma. Quando a lama é congelada, os cristais de gelo em crescimento criam uma rede de canais contínuos em todas as partículas de lama consolidadas. Uma vez que a água livre congelou, a água intersticial e extraída dos flocos da lama através de difusão e adicionada à rede de cristais de gelo (Diak, 2015) (Vesilind et al., 1991).

Tempos maiores de congelamento e temperaturas mais baixas resultam numa maior compactação das partículas causando a agregação das mesmas, o que leva a um aumento do tamanho das partículas e, conseqüentemente, a uma melhor capacidade de desidratação (Vesilind et al., 1991).

Depois de descongelar, a lama pode ser desidratada em filtros prensa ou em leitos de secagem. Os filtros prensa podem produzir lamas desidratadas com siccidades entre os 50 e os 60% de matéria seca (Turovskiy & Mathai, 2006).

2.3.3.3. Elutriação

A elutriação é um processo de condicionamento em que as lamas são lavadas com água potável ou efluente tratado, com o objetivo de remover a alcalinidade da lama através da remoção de compostos orgânicos e inorgânicos dissolvidos na água, particularmente bicarbonatos alcalinos. Este processo reduz a quantidade de coagulante químico necessário para condicionar as lamas na desidratação mecânica (The Institute of Water Pollution Control, 1981) (Turovskiy & Mathai, 2006) (Qasim & Zhu, 2018). A elutriação aplica-se a lamas digeridas anaerobiamente.

A elutriação é essencialmente um processo de lavagem e a sua eficiência depende no grau de diluição. As lamas digeridas são lavadas em contra-corrente com 2 a 5 vezes o seu volume com efluente tratado, e a mistura é deixada a assentar. O sobrenadante, denominado de elutriado, leva os compostos orgânicos e inorgânicos retirados das lamas e voltam para a cabeça da estação. A lama fica no fundo do tanque sendo posteriormente enviada para condicionamento químico e desidratação (The Institute of Water Pollution Control, 1981). Este processo pode ser feito num tanque ou em vários tanques. Estes tanques são semelhantes a espessadores gravítico (Qasim & Zhu, 2018).

Atualmente este processo não é muito utilizado porque ao remover a alcalinidade, o processo de lavagem também remove 10 a 15% dos sólidos das lamas. Estes sólidos quando voltam para a cabeça da estação podem degradar o efluente, aumentando o teor de sólidos e a carga orgânica. Este aumento de sólidos também pode fazer com que a dosagem de polímero para o condicionamento de lamas aumente (Qasim & Zhu, 2018) (Turovskiy & Mathai, 2006).

2.4. Sedimentação

O processo de sedimentação para a remoção de partículas sólidas em suspensão é um dos mais comuns no tratamento de águas residuais para a separação sólido-líquido. Este processo consiste na utilização das forças gravitacionais para separar partículas de densidade superior à da água (Silva, 2010).

Segundo Silva (2010), as partículas coloidais, uma vez que apresentam um tamanho reduzido e uma densidade muito próxima da densidade da água, oferecem dificuldades de remoção no processo de sedimentação simples, requerendo a adição de coagulantes para formar aglomerados ou flocos que

sedimentem com facilidade. A sedimentação, com coagulação prévia, é um processo de clarificação do sobrenadante.

Assim, de acordo com a concentração e a tendência das partículas interagirem entre si, a sedimentação pode ocorrer das seguintes formas:

- **Sedimentação Discreta**

A sedimentação discreta apresenta baixa concentração de partículas em suspensão. Neste processo, os sólidos sedimentam individualmente sem interação significativa entre partículas vizinhas, apresentando por isso velocidades de sedimentação constantes ao longo da coluna de líquido, com movimento retilíneo das partículas. Este tipo de sedimentação observa-se na remoção de saibro e areia (Silva, 2010) (Carlsson, n.d)

- **Sedimentação flocculenta**

Neste processo, as partículas presentes numa suspensão relativamente diluída coalescem ou flocculam no decurso da sedimentação. No caso das partículas sofrerem coalescência, observa-se um aumento de tamanho das partículas (foco) ao longo da decantação e, conseqüentemente, um aumento de velocidade de sedimentação (Sperling, 2007) (Silva, 2010).

Como a flocculação ocorre à medida que as partículas sedimentam, quanto maior a oportunidade de contacto entre elas, maior a probabilidade de haver formação de focos. Deste modo, quanto maior for a profundidade do tanque ou da coluna de sedimentação, maior é a eficiência da sedimentação flocculenta (Sperling, 2007).

Este processo de separação tende a ocorrer no decurso da remoção de focos ou remoção parcial dos sólidos em suspensão na água residual bruta.

- **Sedimentação retardada**

Este fenómeno ocorre em suspensões com elevadas concentrações de sólidos, o que promove a agregação das partículas. Assim, as partículas formam uma massa ou um “manto” que sedimentam como um todo. À medida que o manto vai sedimentando, é possível observar-se uma clara separação entre a fase sólida e a fase líquida (Metcalf & Eddy, 2014) (Sperling, 2007).

A sedimentação pode ser simulada em laboratório através de ensaios de sedimentação ou decantação retardada, utilizando uma coluna de sedimentação. À escala industrial, este fenómeno tem lugar em espessadores de lamas gravíticos ou em decantadores secundários (Sperling, 2007).

- **Sedimentação por compressão**

Refere-se à sedimentação na qual as partículas ocorrem em concentrações tão elevadas que se cria uma estrutura semi-sólida, ocorrendo sedimentação apenas por compressão desta camada (Silva, 2010). A compressão ocorre devido ao peso das partículas que estão na suspensão e sedimentam. Isto leva a que parte da água seja removida da matriz do floco, reduzindo assim o seu volume (Sperling, 2007).

A sedimentação por compressão ocorre no fundo de decantadores secundários e em espessadores de lamas gravíticos.

Em síntese, se se deixar em repouso uma solução contendo partículas em suspensão, será possível distinguir diferentes zonas de sedimentação, tal como se ilustra na Figura 2.2.

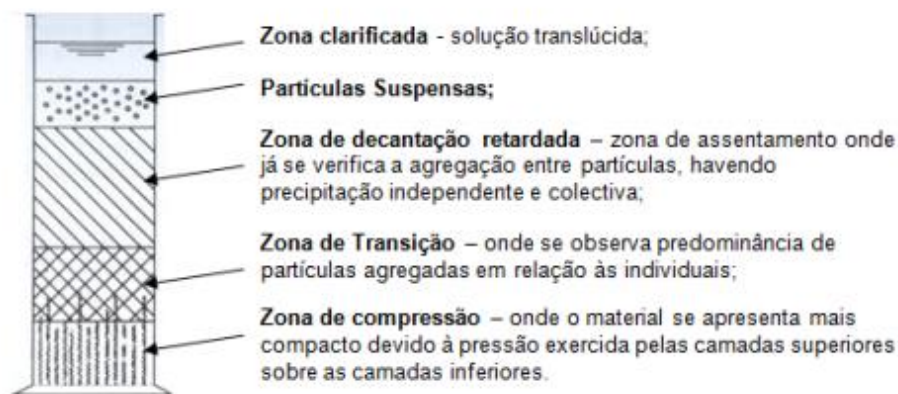


Figura 2.2-Zonas de Sedimentação ao longo de uma suspensão (fonte: Silva, 2010).

Para além destes 4 tipos de sedimentação, é igualmente importante referir um tipo de sedimentação cada vez mais recorrente denominada de sedimentação balastrada. Este tipo de sedimentação necessita de floculação prévia (floculação balastrada).

Durante a floculação, para além do coagulante, é também adicionado um balastro geralmente composto por microareia, com o objetivo de promover a formação de flocos e aumentar a densidade dos mesmos, fazendo com que a sua velocidade de sedimentação aumente. Isto leva a que o tempo de decantação seja 10 vezes mais rápido do que o convencional, permitindo às instalações trabalhar a maiores cargas hidráulicas (USEPA, 2000).

Segundo USEPA (2000), as unidades de floculação balastrada tem operado com cargas hidráulicas entre os 48,9 e os 195,6 m³/m².h, chegando a atingir uma remoção de sólidos de 80 a 95%.

3. Plano experimental

Com a finalidade de avaliar o desempenho dos insolúveis de cal provenientes do tratamento de água para abastecimento público (ETA da Asseiceira) como condicionante, estudou-se o seu contributo relativamente à melhoria da sedimentabilidade das lamas provenientes da ETAR de Castelo Branco, tendo-se efetuado ensaios de sedimentação, e avaliado a qualidade do sobrenadante.

Foram igualmente efetuados ensaios com cal comercial por forma a comparar os resultados obtidos.

A prossecução do trabalho foi suportada pelo plano experimental que se resume na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Plano experimental

<i>Fase</i>	<i>Procedimento</i>
1	Caracterização dos insolúveis de cal
	Caracterização das lamas digeridas da ETAR de Castelo Branco
	Ensaio de sedimentação utilizando cal comercial
2	Caracterização das lamas primárias de Castelo Branco
	Caracterização das lamas biológicas de Castelo Branco
	Ensaio de sedimentação utilizando cal comercial nas lamas primárias e biológicas de Castelo Branco
3	Caracterização das lamas primárias de Castelo Branco
	Jar-test
	Ensaio de sedimentação utilizando insolúveis da cal nas lamas primárias de Castelo Branco
	Análise do sobrenadante
	Jar-test
	Ensaio de sedimentação utilizando cal comercial nas lamas primárias de Castelo Branco
	Análise do sobrenadante
4	Caracterização das lamas biológicas de Castelo Branco
	Jar-test
	Ensaio de sedimentação utilizando insolúveis da cal nas lamas biológicas de Castelo Branco
	Análise do sobrenadante
	Jar-test
	Ensaio de sedimentação utilizando cal comercial nas lamas biológicas de Castelo Branco
	Análise do sobrenadante

Fase 1 e Fase 2

Inicialmente caracterizou-se a amostra de insolúveis da cal provenientes da ETA da Asseiceira, a qual foi utilizada como coagulante nas fases 3 e 4.

Efetuiu-se também a caracterização das lamas primárias, biológicas e digeridas da ETAR de Castelo Branco, que foram posteriormente utilizadas em ensaios de sedimentação com adição de doses de cal comercial.

O objetivo destas fase consistiu na definição de um intervalo de dosagem ótimo, tendo como principais critérios a sedimentabilidade das lamas, bem como os SST, SSV, CQO e Pt do sobrenadante.

Fase 3 e Fase 4

Na fase 3 e na fase 4 realizaram-se ensaios de sedimentação com adição de insolúveis da cal em lamas primárias e biológicas, respetivamente. Comparativamente realizaram-se ensaios de sedimentação com doseamento de cal comercial para as mesmas lamas, nas doses correspondentes ao volume de insolúveis doseado.

Nestas fases procurou-se fazer uma análise comparativa entre os dois coagulantes, através da análise dos parâmetros utilizados nas fases 1 e 2, de modo a verificar a viabilidade da utilização dos insolúveis da cal.

4. Características sumárias da ETA da Asseiceira e da ETAR de Castelo Branco

A amostra de insolúveis da cal utilizada como coagulante é proveniente da ETA da Asseiceira e as amostras de lamas primárias, biológicas e digeridas que serviram de objeto de estudo são provenientes da ETAR de Castelo Branco.

4.1. Caracterização da ETA da Asseiceira

A ETA da Asseiceira (Figura 4.1), sediada no concelho de Tomar, tem uma capacidade nominal de 625000 m³ de água, representando 75% do volume total de água produzido pela EPAL, estando preparada para uma futura ampliação até aos 750000 m³ de água diários (EPAL, n.d).



Figura 4.1-Vista aérea da ETA da Asseiceira (fonte: Águas de Portugal, n.d.).

Possui duas linhas de tratamento da fase líquida, uma com capacidade para tratar um volume de 500000 m³ e outra para tratar os restantes 125000 m³. As duas linhas do tratamento da fase líquida são constituídas pelos seguintes processos: (EPAL, n.d) (SUEZ Degremont, n.d)

- Pré-oxidação com cloro gasoso;
- Remineralização e correção da agressividade da água através do doseamento de água de cal e da injeção de dióxido de carbono;
- Coagulação, recorrendo à utilização de sulfato de alumínio como coagulante;
- Flotação. Em situações pontuais de elevada turvação é adicionado um adjuvante de floculação (polieletrólito) à cabeça dos flotadores;
- Ozonização intermédia;
- Filtração com filtros de areia;
- Equilíbrio e ajuste do pH com água de cal;
- Desinfecção, pós-cloragem.

As duas linhas do tratamento da fase sólida são constituídas pelos seguintes processos: (EPAL, n.d)

- Espessamento gravítico das lamas resultantes dos flotadores e da água de lavagem dos filtros, com a adição de um flocculante (polieletrólito);
- Decantador lamelar, *Densadeg* onde se efetua o reaproveitamento dos insolúveis de cal, provenientes do saturador, para posteriormente reproduzir novamente de água de cal;
- Cisterna de lamas espessadas;
- Desidratação por centrifugas.

4.2. Caracterização da ETAR de Castelo Branco

A ETAR de Castelo Branco (Figura 4.2) localizada em Castelo Branco foi contruída em 2013 e faz parte das Águas do Vale do Tejo – Grupo Água de Portugal. Apresenta uma capacidade para, no horizonte de projeto, efetuar o tratamento de 21082 m³/dia de águas residuais urbanas e industriais, correspondendo a cerca de 96 mil habitantes equivalentes. Entrou em funcionamento em 2013, o que possibilitou a desativação de outras duas ETAR na cidade, as quais apresentavam necessidades de intervenção (Grundfos, n.d).

Esta ETAR destaca-se na região das Beiras por ser a primeira com uma central de cogeração com capacidade para 170 MW, capaz de abastecer quase 30% do consumo elétrico interno, bem como pelo seu sistema de monitorização online, que permite controlar em tempo real quase todas as etapas do processo de tratamento (Grundfos, n.d)



Figura 4.2-Vista aérea da ETAR de Castelo Branco (fonte: Afaplan, n.d.).

A descarga final do efluente tratado é efetuada no ribeiro da Torre, considerado um meio sensível. De acordo com a legislação em vigor, Decreto-Lei nº 152/97, de 19 de julho os parâmetros de rejeição do

efluente terão de obedecer aos limites de descarga seguintes: 25 mgO₂.L⁻¹ de CBO₅, 125 mgO₂.L⁻¹ de CQO, 35 mg.L⁻¹ de SST, 15 mg.L⁻¹ de Nt e 2 mg.L⁻¹ de Pt.

De um modo geral a ETAR de Castelo Branco é constituída por uma linha para tratamento da líquida, uma linha para tratamento da fase sólida e uma linha gasosa para tratamento de odores.

O tratamento fase líquida é constituído pelo:

- Tratamento preliminar que inclui gradagem mecânica, elevação do efluente, tamização, tratamento de efluentes provenientes dos limpa-fossas, remoção de areias, óleos e gorduras;
- Tratamento primário constituído por dois decantadores lamelares compacto – Sedipac 3D;
- Tratamento biológico por lamas ativadas em valas de oxidação, com zonas anóxicas e zonas arejadas em sequência e um decantador secundário a jusante do mesmo. Nas valas de oxidação é adicionado FeCl₃;
- Tratamento terciário composto por uma etapa de filtração e desinfecção para reutilização do efluente tratado como água de serviço;

O tratamento fase sólida inclui:

- Espessamento gravítico das lamas primárias;
- Espessamento de lamas biológicas em excesso em mesas de espessamento;
- Tanque de equalização de lamas mistas;
- Adição de FeCl₃;
- Estabilização de lamas mistas espessadas no digestor anaeróbio e cogeração;
- Desidratação mecânica em centrífugas com a adição de polieletrólito
- Silo de armazenamento de lamas desidratadas.

5. Metodologia

5.1. Jar-test

Os ensaios de Jar-test foram utilizados para misturar diferentes concentrações de insolúveis da cal e de cal comercial com as lamas em estudo. O aparelho Jar-test é composto por pás giratórias, de velocidade regulável, que permite a simulação dos processos de coagulação, floculação e decantação.

Durante os ensaios foi utilizado um modelo de Jar-test da marca *Velp Scientifica FC6S* (Figura 5.1)



Figura 5.1- Aparelho Jar-test utilizado nos ensaios.

O procedimento que se utilizou nos ensaios Jar-test inclui um período de mistura rápida (120 rpm) de 2 minutos, seguido de um período de 10 minutos em mistura lenta (45 rpm).

5.2. Ensaio de Sedimentação

Com a finalidade de avaliar a capacidade de sedimentação das lamas com a adição de cal ou insolúveis de cal realizaram-se ensaios de sedimentação.

Estes ensaios consistiram em verter 1000 mL de lamas condicionadas ou não, para uma coluna de decantação (proveta) e ao longo de 30 minutos foram registadas as alturas da lama na coluna, obtendo-se 14 valores.

Com estes valores calculou-se as velocidades de sedimentação na zona ponto critico (zona de entrada em compressão) através do método de Kynch (Equação 5.1) (Kynch, 1952).

$$u = \frac{Z_i - Z}{t} \quad (5.1)$$

em que Z_i é a interceção da reta tangente ao ponto com o eixo das ordenadas, Z a altura de lamas e t o tempo.

Após os ensaios, recolheu-se o sobrenadante e efetuou-se a sua caracterização.

5.3. Medição de parâmetros

Com o objetivo de caracterizar as lamas e avaliar o potencial dos insolúveis da cal, tanto no espessamento de lamas como na melhoria da qualidade das escorrências, determinaram-se os seguintes parâmetros físicos e químicos de acordo com os protocolos que se apresentam nos anexos I a VI:

- pH-Anexo I;
- CQO- Anexo III e IV;
- Fósforo Total- Anexo V e VI
- Sólidos suspensos totais e Sólidos suspensos voláteis- Anexo II

5.4. Fase 1

5.4.1. Caracterização dos insolúveis da cal

O coagulante em estudo – insolúveis de cal – surge como subproduto da produção de água de cal na ETA da Asseiceira. Os insolúveis da cal são uma solução de sedimentação rápida, onde o principal agente da suspensão é o cálcio.

No dia 3 de Julho de 2019, a amostra utilizada na realização dos ensaios foi recebida no laboratório da Faculdade de Ciências e Tecnologia- U.N.L., e armazenada numa arca frigorífica a 5°C. No dia 4 de Julho procedeu-se á sua caracterização através da determinação dos SST, CQO e pH da amostra, de acordo com os protocolos anteriormente referidos. Fez-se também um ensaio de sedimentação (Figura 5.2) e analisou-se a composição iónica dos insolúveis da cal (Anexo VII)

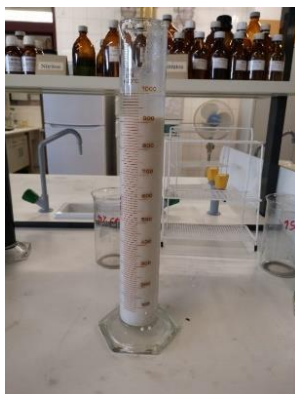


Figura 5.2- Ensaio de sedimentação com insolúveis de cal.

5.4.2. Caracterização das lamas

No dia 3 de Julho no laboratório da Faculdade de Ciências e Tecnologia- U.N.L., foi recebida uma amostra de 30L de lamas digeridas, e armazenadas numa arca frigorífica a 5°C. No dia seguinte procedeu-se á sua caracterização. Efetuou-se um ensaio de sedimentação numa proveta de 1000mL (Figura 5.3) e determinou-se o pH, SST e SSV, e CQO, de acordo com os protocolos apresentados nos anexos I, II e III, respetivamente.



Figura 5.3-Ensaio de sedimentação.

Para a análise da CQO, efetuou-se uma diluição da amostra, de maneira a que a matéria orgânica presente nas lamas não consumisse na totalidade o dicromato de potássio, impossibilitando assim a determinação da CQO. Deste modo, pipetou-se 5mL de amostra para um balão volumétrico de 250mL, perfazendo-o com água destilada. Homogeneizou-se o conteúdo do balão e fez-se uma toma de 10mL para a determinação.

Não ocorreu qualquer sedimentação nos ensaios realizados, impossibilitando assim a colheita de sobrenadante, pelo qual não se procedeu à análise do mesmo.

No dia 1 de Agosto de 2019 foi recolhida uma amostra de lamas digeridas na ETAR de Castelo Branco que foram imediatamente analisadas no laboratório de processo da ETAR, de modo a que as lamas não entrassem em decomposição, o que poderia afetar os ensaios. Foi feita a caracterização das mesmas através da determinação de pH, SST e SSV e realizaram-se os ensaios de sedimentação.

5.4.3. Doseamento de cal comercial e ensaios de sedimentação

Nos dias 4, 7, 8 e 9 de Julho de 2019 realizaram-se ensaios de sedimentação com doseamento de cal comercial (hidróxido de cálcio), com uma pureza de 96% (Figura 5.4). Nesta fase como ainda não se sabia a composição iónica dos insolúveis da cal optou-se por testar primeiro a cal comercial e depois os insolúveis.

Considerou-se que a cal comercial se encontrava desprovida de humidade, pelo que a quantidade de sólidos introduzidos na água residual é igual à quantidade de coagulante doseado.



Figura 5.4-Cal comercial utilizada

As doses de cal comercial utilizadas foram de acordo com a bibliográfica consultada, em função da quantidade de sólidos presentes nas lamas e que se resumem na Tabela 5.1.

Tabela 5.1-Intervalo de doseamento de cal comercial, testado no Laboratório da FCT.

% MS presente nas lamas	10%	15%	20%	25%	30%
Ca(OH) ₂ (g/L)	2,175	3,263	4,350	5,438	6,525

Para misturar a cal com as lamas inicialmente testou-se utilizar Jar-test (Figura 5.5), mas observou-se que o Jar-test não tinha capacidade para dissolver a cal na sua totalidade. Deste modo utilizou-se uma vareta para ajudar a dissolver a cal.



Figura 5.5- Jar-test com lamas e cal comercial.

No final dos ensaios não se verificou qualquer efeito da cal na sedimentabilidade das lamas, pelo que não se conseguiu recolher sobrenadante, impossibilitando assim a sua análise

No dia 1 de Agosto de 2019, no laboratório de processo da ETAR de Castelo Branco, realizaram-se os ensaios com o mesmo procedimento, adaptando a quantidade de cal à concentração de sólidos das lamas. As doses utilizadas resumem-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2- Intervalo de doseamento de cal comercial, testado na ETAR de Castelo Branco.

% MS presente nas lamas	10%	15%	20%	25%	30%
Ca(OH)_2 (g/L)	2,745	4,118	5,490	6,862	8,235

5.5. Fase 2

5.5.1. Caracterização das lamas

No dia 2 de Agosto de 2019 foram recolhidas duas amostras, uma de lamas primárias e outra de lamas biológicas, na ETAR de Castelo Branco que foram imediatamente analisadas no laboratório de processo da ETAR de modo a que as lamas não entrassem em decomposição, o que poderia afetar os resultados. Foi feita a caracterização das mesmas através da determinação de pH, SST, SSV e CQO, de acordo com os protocolos I, II e IV, respetivamente, tendo-se realizado igualmente os ensaios de sedimentação (Figura 5.6).

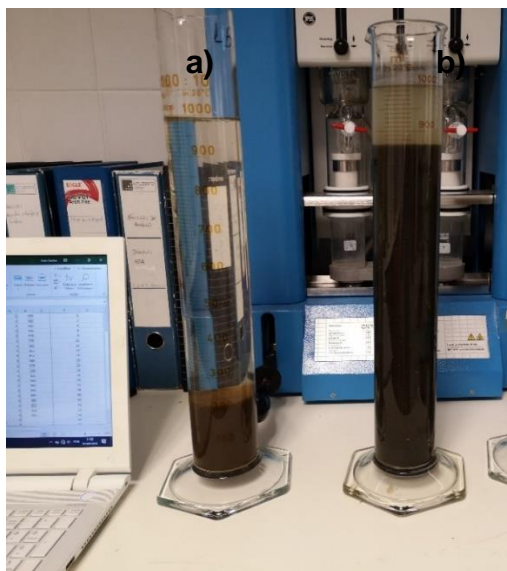


Figura 5.6- Ensaio de sedimentação com lamas biológicas (a) e lamas primárias (b).

5.5.2. Doseamento de cal comercial e ensaios de sedimentação

No mesmo dia efetuaram-se ensaios de sedimentação em provetas de 1000mL, com doseamento de cal, para as lamas primárias e para as lamas biológicas. Nos ensaios com lamas primárias, a percentagem de cal por peso seco foi igual à utilizada na fase 1. Para as lamas biológicas, só foi possível utilizar doses de cal até aos 15% de peso seco.

As doses utilizadas de cal para as lamas primárias e para as lamas biológicas encontram-se na Tabela 5.3 e Tabela 5.4, respetivamente.

Tabela 5.3-Intervalo de dose utilizada para as lamas primárias.

% MS presente nas lamas	10%	15%	20%	25%	30%
Ca(OH)_2 (g/L)	0,34	0,51	0,68	0,85	1,02

Tabela 5.4-Intervalo de dosagem utilizado para as lamas biológicas.

% MS presente nas lamas	10%	15%
Ca(OH)_2 (g/L)	0,08	0,12

Após conclusão dos ensaios de sedimentação, recolheu-se o sobrenadante de cada proveta e analisaram-se os parâmetros pH, CQO e Pt, de acordo com os protocolos apresentados nos Anexos I, IV e VI.

5.6. Fase 3

5.6.1. Caracterização das lamas primárias

No dia 10 de Setembro de 2019 foi recolhida uma amostra de 30L de lamas primárias da ETAR de Castelo Branco que foram transportadas até ao laboratório da Faculdade de Ciências e Tecnologia-U.N.L., e armazenadas numa arca frigorífica a 5°C. No dia 12 de Setembro de 2019 procedeu-se à caracterização das mesmas, através da determinação do pH, CQO, Pt, SST e SVS e da realização de um ensaio de sedimentação. No sobrenadante resultante deste ensaio foram também determinados os parâmetros pH, SST e SSV, CQO e Pt, de acordo com os protocolos apresentados nos Anexos I, II, III e V, respetivamente.

Para a análise da CQO das lamas, efetuou-se uma diluição da amostra, de maneira a que a matéria orgânica presente nas lamas não consumisse na totalidade o dicromato de potássio, impossibilitando assim a determinação da CQO. Deste modo, pipetou-se 5mL de amostra para um balão volumétrico de 250mL, perfazendo-o com água destilada. Homogeneizou-se o conteúdo do balão e fez-se uma toma de 10mL para a determinação. No sobrenadante foi feita uma toma de 5 mL de amostra para um balão volumétrico de 25mL, perfazendo-o com água destilada. Homogeneizou-se o conteúdo do balão e fez-se uma toma de 10mL para a determinação.

Para determinação dos SST e SSV das lamas, como se esperava que as lamas contivessem uma elevada concentração de sólidos, efetuaram-se tomas de 5mL para a sua determinação de modo a que o filtro não colmatasse. No sobrenadante foi efetuada uma toma de 20mL.

5.6.2. Doseamento de insolúveis da cal e ensaios de sedimentação

Os volumes para o doseamento de coagulante foram 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 mL de insolúveis de cal e as suas respetivas diluições. O coagulante foi diluído em provetas de 100 mL e seguidamente agitado e adicionado aos copos com uma amostra de 900 mL de lama que estavam em agitação rápida no aparelho Jar-test. Os ensaios foram efetuados nos dias 12 e 13 de Setembro, tendo-se testado no dia 12 os volumes 100, 90, 80, 70 e 60, e no dia 13 os restantes volumes. Na Tabela 5.5 encontram-se os volumes de lamas, dos insolúveis da cal e de água destilada utilizados neste ensaio.

Tabela 5.5- Volumes de lamas, insolúveis e as respectivas diluições utilizadas no ensaio.

Lamas (mL)	Insolúveis da cal (mL)	Água destilada (mL)
900	100	0
900	90	10
900	80	20
900	70	30
900	60	40
900	50	50
900	40	60
900	30	70
900	20	80
900	10	90

O aparelho Jar-test utilizado (Figura 5.1) constituiu uma barreira física, pelo que uma parte de insolúveis de cal ficavam retidos nas provetas utilizadas. Deste modo, procedeu-se á lavagem das provetas com uma quantidade mínima de água destilada de maneira a tentar maximizar o aproveitamento do coagulante sem correr o risco de diluir em demasia a amostra (Figura 5.7).

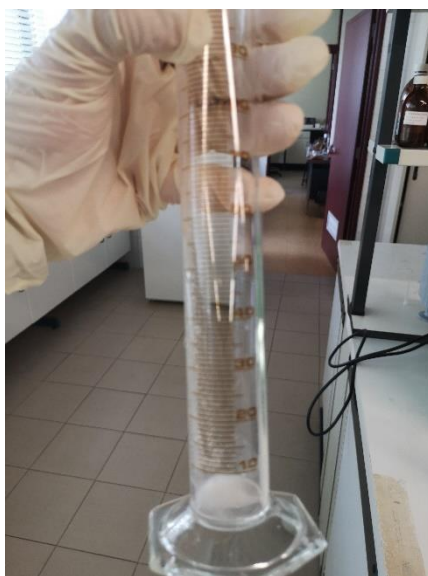


Figura 5.7- Insolúveis da cal retidos na proveta após doseamento.

Após o ensaio de Jar-test, cada copo foi retirado do aparelho e cada amostra foi vertida para uma proveta de 1000mL onde se procedeu aos ensaios de sedimentação (Figura 5.8 e Figura 5.9).



Figura 5.8-Ensaio de sedimentação com os volumes 100, 90, 80, 70, 60 de insolúveis da cal, após a recolha do sobrenadante.



Figura 5.9-Ensaio de sedimentação com os volumes 40, 30, 20, 10 de insolúveis da cal.

No final dos ensaios foi recolhido o sobrenadante de cada proveta, com uma pipeta graduada de 50mL inserida cuidadosamente no sobrenadante de modo não perturbar a suspensão, o que poderia alterar a qualidade do sobrenadante.

Nos sobrenadantes foram efetuadas análises aos parâmetros pH, CQO, Pt, SST e SSV tendo-se calculado a eficiência de remoção de cada um deles.

Para a análise da CQO, efetuaram-se diluições das amostras, de maneira a que a matéria orgânica presente no sobrenadante não consumisse na totalidade o dicromato de potássio, impossibilitando assim a determinação da CQO. Deste modo, pipetou-se 5mL de cada amostra para o respetivo balão volumétrico de 20mL, perfazendo-o com água destilada. Homogeneizou-se o conteúdo dos balão e fez-se as tomas de 10mL para a determinação.

Para determinação dos SST e SSV, como o sobrenadante dos ensaios aparentava ter uma concentração de sólidos baixa, efetuaram-se tomas de 100mL para a sua determinação.

5.6.3. Doseamento de cal comercial e ensaios de sedimentação

Nesta fase já se conhecia os resultados da análise à composição iónica dos insolúveis da cal (Anexo VII). Isto permitiu identificar a concentração de cálcio presente na amostra ($[Ca^{2+}] = 560 \text{ mg.L}^{-1}$) e converter os volumes de insolúveis da cal utilizados (Tabela 5.5) em carbonato de cálcio ($CaCO_3$) de acordo com a equação (5.2.)

$$\frac{\text{Massa molar do elemento}}{\text{Valência do elemento}} \quad (5.2)$$

A conversão para a unidade de $CaCO_3$ permitiu o doseamento de quantidades idênticas de cal e de insolúveis da cal, permitindo assim comparar os dois. Na Tabela 5.6 resumem-se as conversões das dosagens de insolúveis da cal em $CaCO_3$ e a sua conversão para cal comercial ($Ca(OH)_2$). Os ensaios foram realizados nos dias 18 e 19 de setembro, sendo que no dia 18 testaram-se as 5 concentrações mais altas e no dia 19 as restantes.

Tabela 5.6- Volume de insolúveis da cal doseados e a sua conversão para mg $CaCO_3$ /L e mg $Ca(OH)_2$ /L.

Volume de insolúveis de cal (mL)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
[$CaCO_3$] (mg $CaCO_3$ /L)	139,9	125,9	111,9	97,9	83,9	69,9	55,9	42	27,9	13,9
[$Ca(OH)_2$] (mg $Ca(OH)_2$ /L)	103,6	93,2	82,9	72,5	62,2	51,8	41,4	31,1	20,7	10,4

A cal foi pesada e adicionada aos copos com 1000mL de lamas primárias, quando estas se encontravam em agitação rápida no Jar-test. Na Figura 5.10 apresentam-se as quantidades máximas e mínimas de cal doseadas.

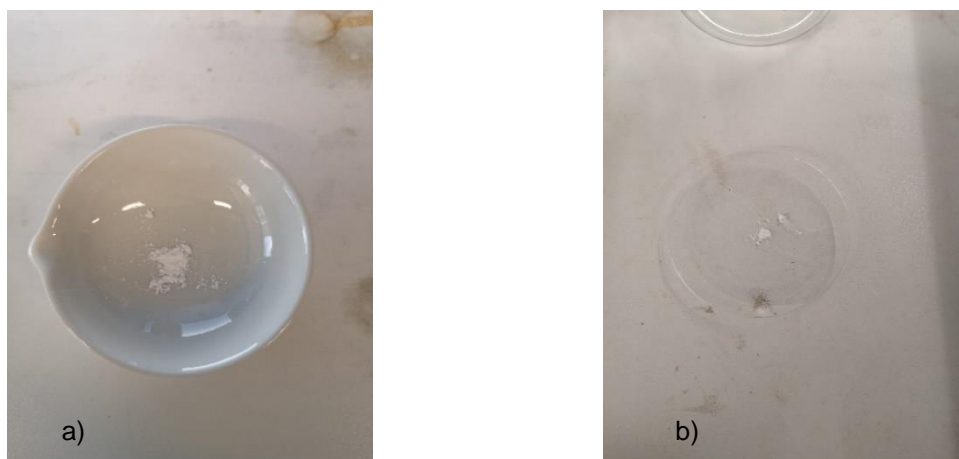


Figura 5.10-Quantidade máxima (a) e mínima (b) de cal comercial utilizada

Após o ensaio de Jar-test, cada copo foi retirado do aparelho e as amostras foram vertidas para provetas de 1000mL, onde se procedeu aos ensaios de sedimentação (Figura 5.11).



Figura 5.11- Ensaio de sedimentação com cal comercial após colheita do sobrenadante.

No final dos ensaios foi recolhido o sobrenadante de cada proveta, com uma pipeta graduada de 50mL inserida cuidadosamente no sobrenadante de modo não perturbar a suspensão, o que poderia alterar a qualidade do sobrenadante.

Ao sobrenadante efetuaram-se análises aos parâmetros pH, CQO, Pt, SST e SSV, calculando-se a eficiência de remoção de cada um deles, comparando-se com os resultados obtidos para a mesma concentração de insolúveis da cal.

Para a análise da CQO, efetuaram-se diluições das amostras, de maneira a que a matéria orgânica presente no sobrenadante não consumisse na totalidade o dicromato de potássio, impossibilitando

assim a determinação da CQO. Deste modo, pipetou-se 5mL de cada amostra para o respetivo balão volumétrico de 20mL, perfazendo-o com água destilada. Homogeneizou-se o conteúdo dos balão e fez-se as tomas de 10mL para a determinação.

Para determinação dos SST e SSV, como o sobrenadante dos ensaios aparentava ter uma elevada concentração de sólidos, efetuaram-se tomas de 10mL para a sua determinação.

5.7. Fase 4

5.7.1. Caracterização das lamas biológicas

No dia 10 de Setembro, à semelhança da fase 3, foi recolhida uma amostra de 30L de lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco que foram transportadas até ao laboratório da Faculdade de Ciências e Tecnologia- U.N.L., e armazenadas numa arca frigorífica a 5°C. No dia 1 de Outubro procedeu-se á caracterização das mesmas, através da determinação do pH, CQO, Pt, SST e SVS e da realização de um ensaio de sedimentação (Figura 5.12). Para o sobrenadante resultante deste ensaio foram também determinados os parâmetros pH, CQO, Pt, SST e SSV.

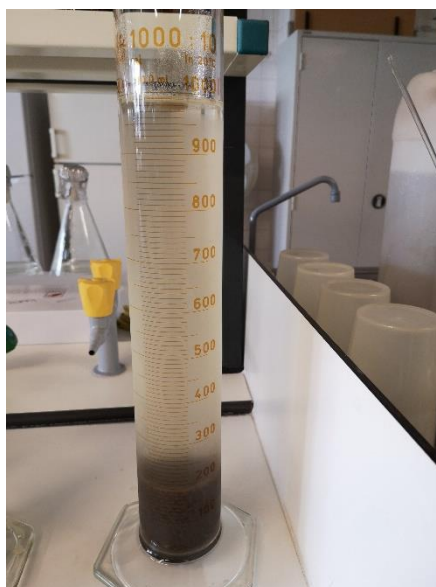


Figura 5.12-Ensaio de sedimentação com lamas biológicas.

Para a análise da CQO, efetuou-se uma diluição da amostra. Deste modo, pipetou-se 5mL de amostra para um balão volumétrico de 25mL, perfazendo-o com água destilada. Homogeneizou-se o conteúdo do balão e fez-se uma toma de 10mL para a determinação. Procedeu-se da mesma maneira para determinar a CQO presente no sobrenadante resultante do ensaio de sedimentação com as lamas biológicas.

Para determinação dos SST e SSV das lamas efetuaram-se tomas de 20mL para a sua determinação de modo a que o filtro não colmatasse. Para o sobrenadante, a toma efetuada foi de 50mL.

5.7.2. Doseamento de insolúveis da cal e ensaios de sedimentação

O procedimento foi igual ao efetuado na fase 3. Os ensaios decorreram nos dias 1 e 2 de Outubro de 2019 em que no dia 1 testaram-se os volumes 100, 90, 80, 70 e 60 e no dia 2 os volumes 50, 40, 30, 20, 10. Na Tabela 5.5 resumem-se os volumes de lamas, dos insolúveis da cal e de água destilada utilizados neste ensaio.

Após o ensaio de Jar-test, cada copo foi retirado do aparelho e cada amostra foi vertida para uma proveta de 1000mL onde se procedeu aos ensaios de sedimentação (Figura 5.13 e Figura 5.14).

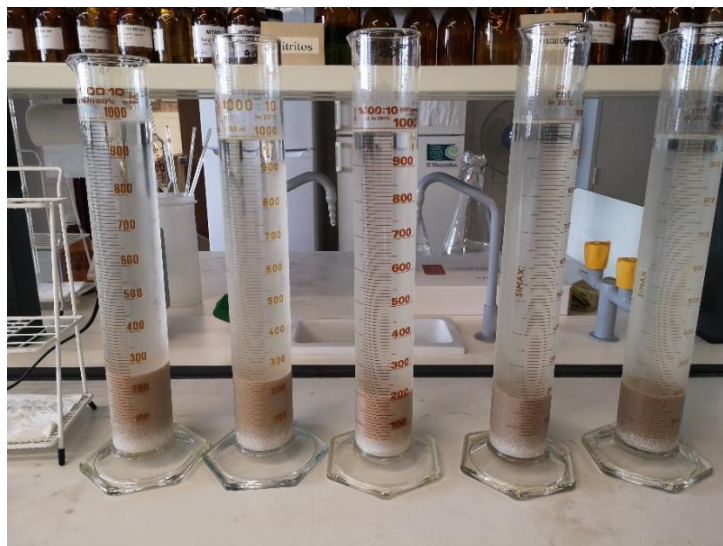


Figura 5.13-Ensaio de sedimentação de lamas biológicas com os volumes 100, 90, 80, 70, 60 de insolúveis da cal.



Figura 5.14-Ensaio de sedimentação de lamas biológicas com os volumes 50, 40, 30, 20 e 10 de insolúveis da cal, após remoção do sobrenadante.

No final dos ensaios foi recolhido o sobrenadante de cada proveta, com uma pipeta graduada de 50mL inserida cuidadosamente no sobrenadante de modo não perturbar a suspensão, o que poderia alterar a qualidade do sobrenadante.

Ao sobrenadante efetuaram-se análises aos parâmetros pH, CQO, Pt, SST e SSV, calculando-se a eficiência de remoção de cada um deles.

Para a análise da CQO efetuou-se uma diluição da amostra. Deste modo, pipetou-se 5mL de cada amostra para tubo aos quais se adicionou 5mL de água para fazer a toma de 10mL.

Para determinação dos SST e SSV, como o sobrenadante dos ensaios aparentava ter uma concentração de sólidos baixa, efetuaram-se tomas de 100mL para a sua determinação.

5.7.3. Doseamento de cal comercial e ensaios de sedimentação

O procedimento foi igual ao efetuado na fase 3 e as doses testadas de cal comercial estão referidas na Tabela 5.6. A única diferença nesta fase foi que se optou por diluir as doses de cal comercial utilizadas em 100mL de água destilada, de modo a promover a mistura com as lamas em Jar-test. Para isso, cada dose de cal foi adicionada a um balão volumétrico de 100mL perfazendo-o com água destilada (Figura 5.15 e Figura 5.16).



Figura 5.15-Diluição da cal em balões volumétricos de 100mL com água destilada. Doses correspondentes a 100, 90, 80, 70, 60 mL de insolúveis de cal.



Figura 5.16-Diluição da cal em balões volumétricos de 100mL com água destilada. Doses correspondentes a 50, 40, 30, 20, 10 mL de insolúveis de cal.

De seguida, no aparelho Jar-test, o conteúdo dos balões foi vertido para os copos que continham 900mL de lamas em agitação rápida. O aparelho constituiu uma barreira física, pelo que uma parte da solução ficou retida nos balões (Figura 5.17).

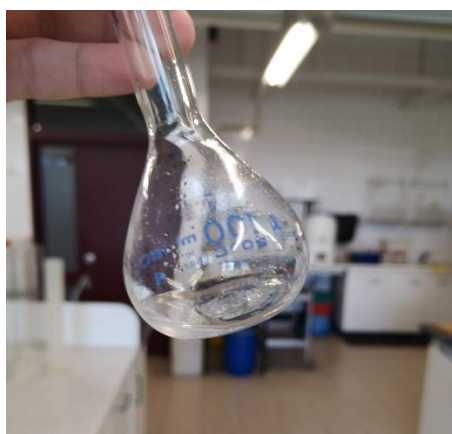


Figura 5.17- Solução que ficou retida no balão após doseamento no Jar-test.

Após o ensaio de Jar-test, cada copo foi retirado do aparelho e cada amostra foi vertida para uma proveta de 1000mL onde se procedeu aos ensaios de sedimentação (Figura 5.18 e Figura 5.19).



Figura 5.18- Ensaio de sedimentação de lamas biológicas com as doses de cal correspondentes aos volumes de 100, 90, 80, 70 e 60 mL de insolúveis da cal.



Figura 5.19-Ensaio de sedimentação de lamas biológicas com as doses de cal correspondentes aos volumes de 50, 40, 30, 20 e 10mL de insolúveis da cal.

No final dos ensaios foi recolhido o sobrenadante de cada proveta, com uma pipeta graduada de 50mL inserida cuidadosamente no sobrenadante de modo não perturbar a suspensão, o que poderia alterar a qualidade do sobrenadante.

Ao sobrenadante efetuaram-se análises aos parâmetros pH, CQO, Pt, SST e SSV segundo os protocolos apresentados nos Anexos I, III, V e II, respetivamente, tendo-se a eficiência de remoção de cada um deles.

Para a análise da CQO, efetuaram-se diluições das amostras. Deste modo, pipetou-se 5mL de cada amostra para tubo aos quais se adicionou 5mL de água para fazer a toma de 10mL.

Para determinação dos SST e SSV, como o sobrenadante dos ensaios aparentava ter uma concentração de sólidos mais elevada que o sobrenadante dos ensaios com lamas biológicas e insolúveis da cal, efetuaram-se tomas de 50mL para a sua determinação.

6. Resultados e Discussão

6.1. Fase 1

A caracterização dos insolúveis da cal utilizados como coagulante nas fase 3 e 4 da dissertação resume-se na Tabela 6.1.

Tabela 6.1- Caracterização dos insolúveis da cal.

Parâmetro	Unidades	Valor
pH	-	12,5
SST	g/L	35,87
CQO	mg O ₂ /L	40

Dada a sua origem, era esperado que o coagulante utilizado não apresentasse valores de CQO, o que não se verificou indicando alguma contaminação da amostra. Relativamente ao pH, os insolúveis da cal são um subproduto da cal comercial, que quando hidratada leva a que o hidróxido de cálcio sofra a carbonatação formando CaCO₃. Este CaCO₃ confere alcalinidade à amostra, o que se traduz num valor de pH elevado.

Os resultados do ensaio de sedimentação com 1L de insolúveis da cal encontram-se na Figura 6.1. A amostra de coagulante continha uma elevada concentração de sólidos, pelo que a velocidade de sedimentação é constante, onde a sedimentação ocorre por compressão.

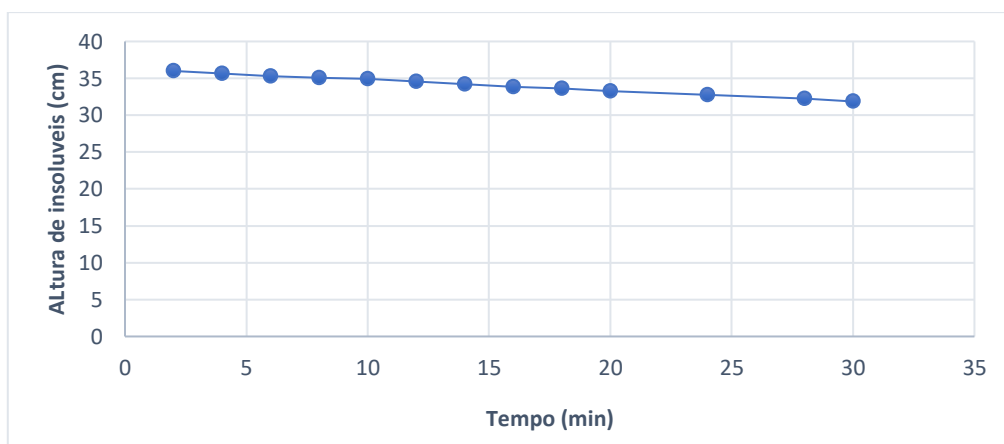


Figura 6.1- Ensaio de sedimentação com os insolúveis de cal.

A caracterização das lamas utilizadas nesta fase encontra-se na Tabela 6.2. Estas lamas foram previamente espessadas, quer por espessamento gravítico quer por mesas de espessamento com adição de polieletrólito, e depois foram encaminhadas para o digestor onde foram estabilizadas.

Tabela 6.2- Caracterização das lamas digeridas da ETAR de Castelo Branco.

Parâmetro	Unidades	Valor
pH	-	7,6
SST	g/L	21,8
SSV	g/L	7,4
CQO	mg O ₂ /L	18277

O resultado do ensaio de sedimentação para as lamas em estudo encontra-se na Figura 6.2.

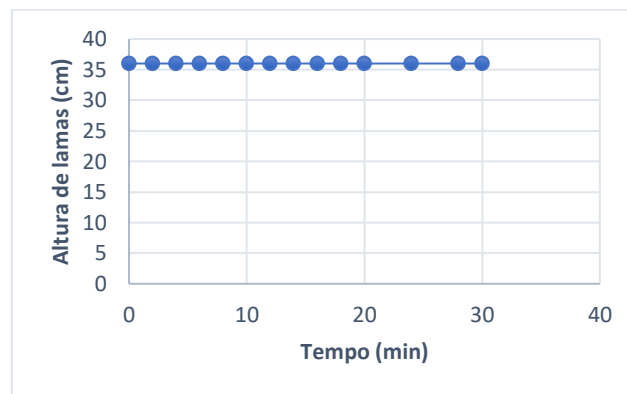


Figura 6.2- Resultado do ensaio de sedimentação com as lamas digeridas da ETAR de Castelo Branco.

Como se pode observar pela Figura 6.2, durante o ensaio não ocorreu qualquer sedimentação das lamas pelo que não se calculou a velocidade de sedimentação. Como não houve formação de sobrenadante também não foi possível proceder-se à caracterização do mesmo.

Os resultados dos ensaios de sedimentação para as mesmas lamas, com adição de cal comercial encontram-se nas Figura 6.3 a Figura 6.7. As doses de cal doseadas, como referido anteriormente, encontram-se na Tabela 5.1.

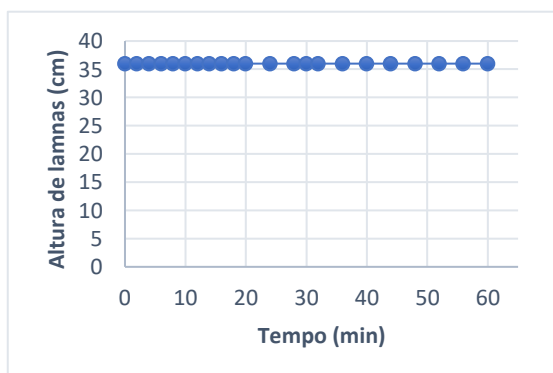


Figura 6.3- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 10% do seu peso em cal comercial.

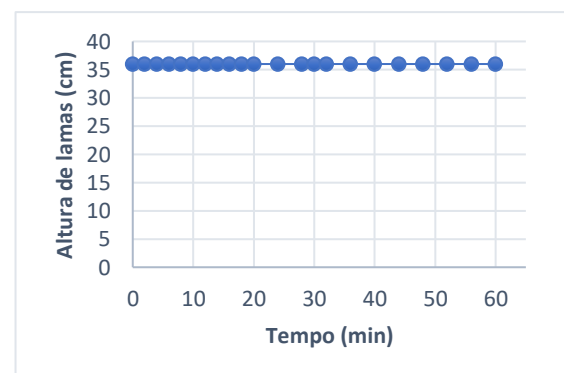


Figura 6.4- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 15% do seu peso em cal comercial.

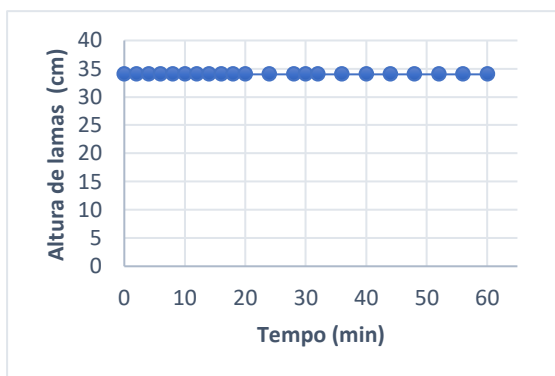


Figura 6.5- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 20% do seu peso em cal comercial.

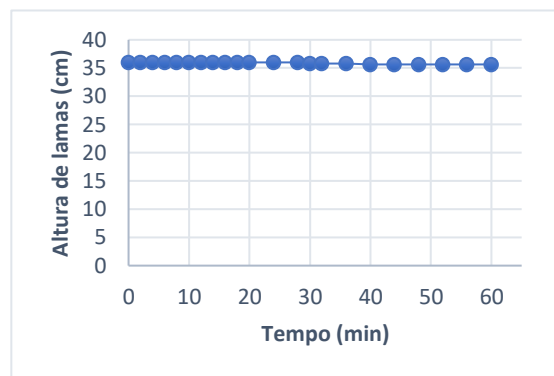


Figura 6.6- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 25% do seu peso em cal comercial.

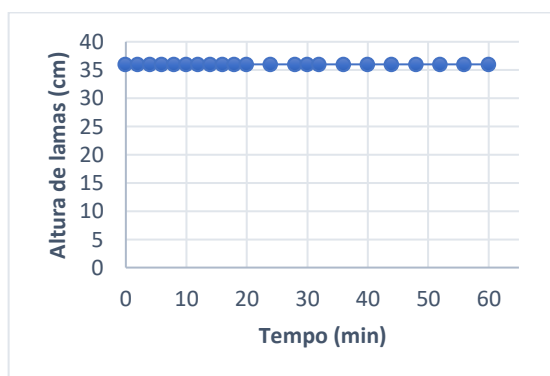


Figura 6.7- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 30% do seu peso em cal comercial.

Os ensaios de sedimentação com cal comercial para estas lamas foram considerados inconclusivos pois não ocorreu qualquer sedimentação das lamas, quer com cal quer sem cal. A causa para a não sedimentação das lamas não é certa, havendo porem algumas hipóteses. Uma das hipóteses é que as lamas têm uma carga negativa tão elevada, que a adição de cal não permite quebrar as ligações entre a água e os sólidos suspensos, não havendo por isso separação sólido líquido. Outra hipótese poderá decorrer do facto das lamas, como já foram previamente espessadas quer em espessador gravítico, quer em mesas de espessamento com polieletrólito, viram toda a água livre removida, fazendo com que a restante água existente nas lamas só possa ser retirada com recurso a equipamentos mecânicos.

A ocorrência de reações provocadas pela presença de oxigénio nas lamas também surgiu como hipótese. As lamas foram digeridas em condições anaeróbias pelo que o transporte da ETAR para o laboratório da FCT poderia ter levado a que as lamas entrassem em aerobiose. Assim, realizaram-se ensaios na própria ETAR de Castelo Branco de modo a recolher as lamas e analisá-las imediatamente.

A caracterização das lamas em estudo efetuada no laboratório de processo da ETAR de Castelo Branco encontra-se na Tabela 6.3. Os resultados obtidos nos ensaios de sedimentação com a adição de cal comercial encontram-se na Figura 6.9 até à Figura 6.12.

Tabela 6.3- Caracterização das lamas digeridas da ETAR de Castelo Branco.

Parâmetro	Unidades	Valor
pH	-	7,5
SST	g/L	27,5
SSV	g/L	9,6
CQO	mg O ₂ /L	18858

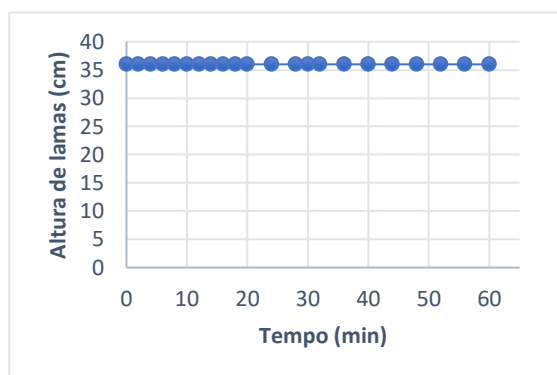


Figura 6.9- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 10% do seu peso em cal comercial.

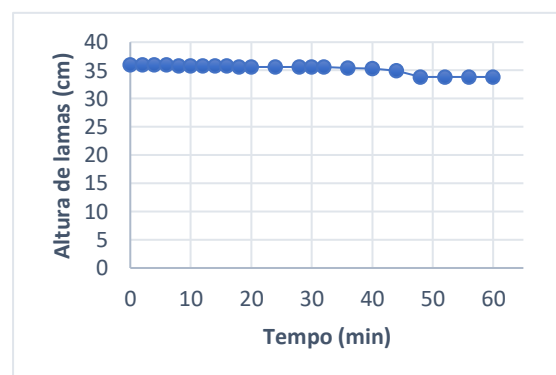


Figura 6.8- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 15% do seu peso em cal comercial.

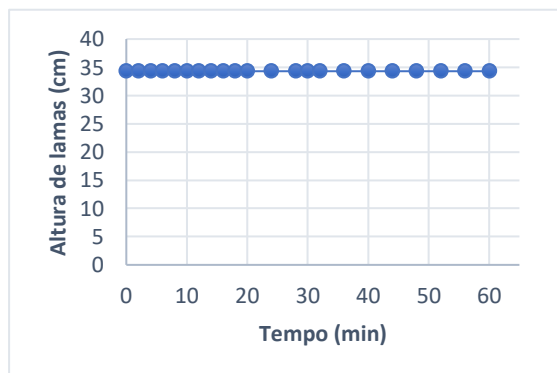


Figura 6.10- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 20% do seu peso em cal comercial.

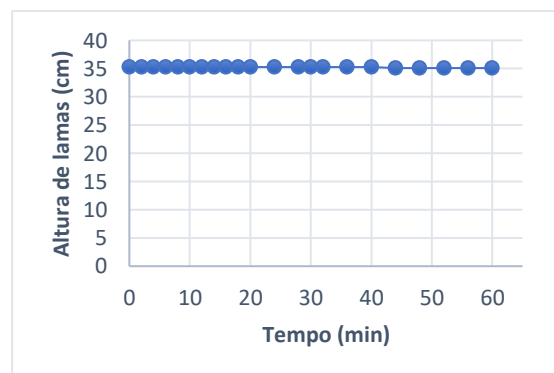


Figura 6.11- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 25% do seu peso em cal comercial.

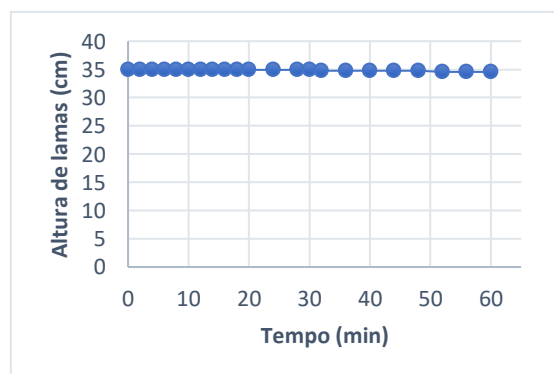


Figura 6.12- Curva de sedimentação de lamas digeridas, condicionadas com 30% do seu peso em cal comercial.

Os resultados obtidos dos ensaios de sedimentação para as lamas digeridas da ETAR de Castelo realizados no laboratório de processo da mesma ETAR são idênticos aos resultados obtidos no laboratório da FCT, não havendo sedimentação das lamas. Deste modo, os ensaios para estas lamas consideraram-se inconclusivos.

6.2. Fase 2

A caracterização das lamas primárias da ETAR de Castelo Branco encontra-se na Tabela 6.4 e o resultado do ensaio de sedimentação encontra-se na Figura 6.13.

Tabela 6.4- Caracterização das lamas primárias da ETAR de Castelo Branco utilizadas na fase 2.

Parâmetro	Unidades	Lamas
pH	-	7,2
SST	g/L	3,41
CQO	mg O ₂ /L	11563

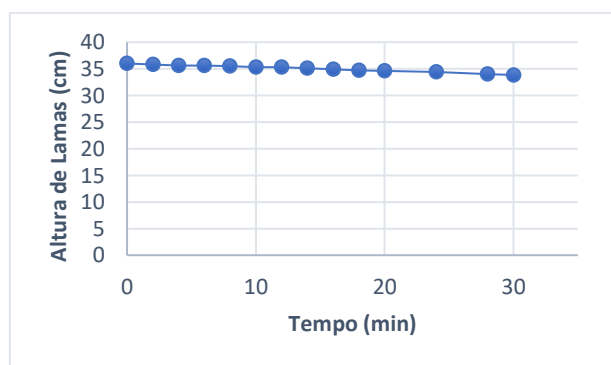


Figura 6.13-Curva de sedimentação das lamas primárias da ETAR de Castelo Branco.

As doses de cal comercial utilizadas nos ensaios de sedimentação encontram-se na Tabela 5.3. Nas figuras seguintes encontram-se os resultados destes ensaios com doseamento de cal comercial (Figura 6.15 até à Figura 6.18).

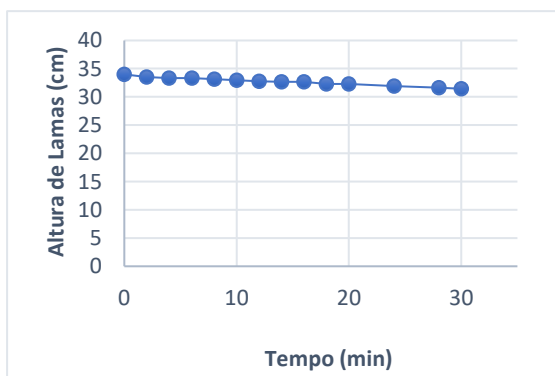


Figura 6.15- Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 10% do seu peso em cal comercial.

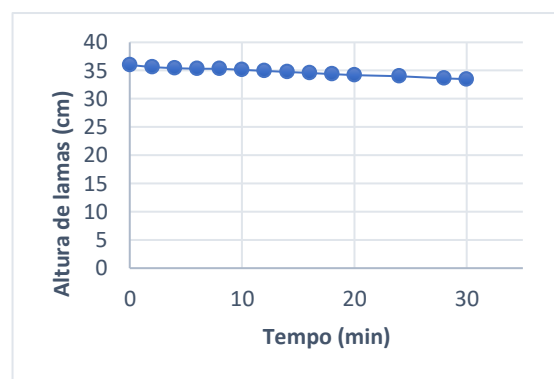


Figura 6.14-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 15% do seu peso em cal comercial.

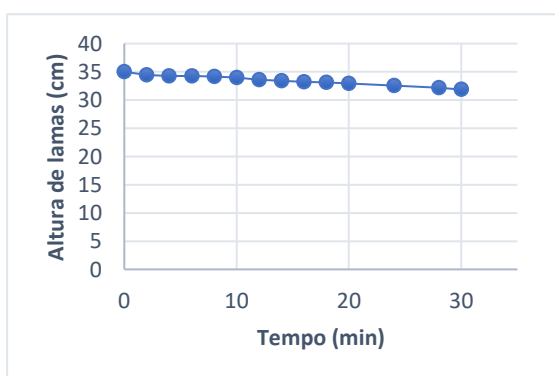


Figura 6.17-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 20% do seu peso em cal comercial.

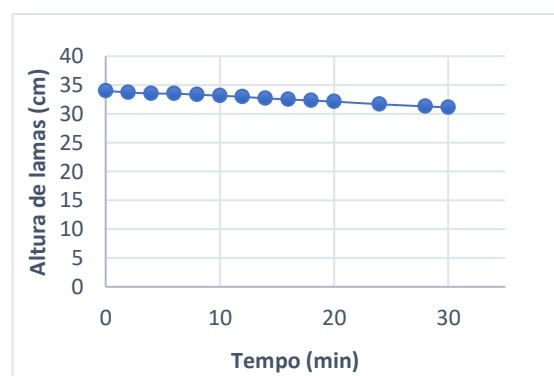


Figura 6.16-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 25% do seu peso em cal comercial.

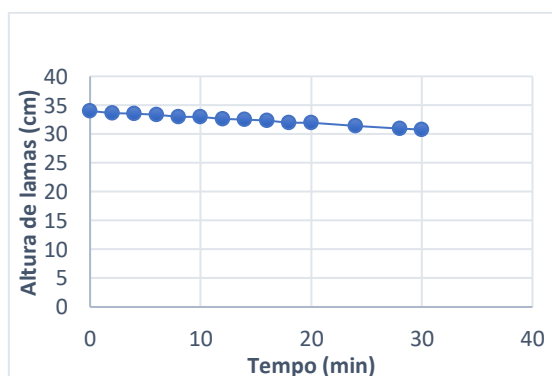


Figura 6.18-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 30% do seu peso em cal comercial.

O doseamento de cal conduziu a uma maior sedimentação das lamas primárias quando se adicionou 20 e 30% do seu peso seco em cal comercial, tendo-se verificado uma diferença entre a altura inicial de lamas e a final de 3,15 cm e 3,23 cm respetivamente. Para as outras concentrações verificou-se uma diferença de 2,55 cm para os 10% de cal, 2,52cm para os 15% e 2,89 cm para os 25%.

Os resultados das análises ao sobrenadante recolhido após os ensaios de sedimentação encontram-se na Tabela 6.5.

Tabela 6.5- Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas primárias condicionadas com cal comercial.

Cal comercial doseada (% MS nas lamas)	Cal comercial doseada (gCa(OH) ₂ /L)	pH	Pt (mg/L)	CQO (mg O ₂ /L)
0%	0	7,1	35,83	673
10%	0,34	8,1	20,82	963
15%	0,51	8,9	8,28	914
20%	0,68	9,4	9,68	905
25%	0,85	9,9	23,22	1002
30%	1,02	10,4	16,42	1295

Nas figuras seguintes pode-se observar a influencia do doseamento de cal comercial no valor de pH do sobrenadante (Figura 6.19), bem como na remoção de CQO (Figura 6.20) e de Pt (Figura 6.21).

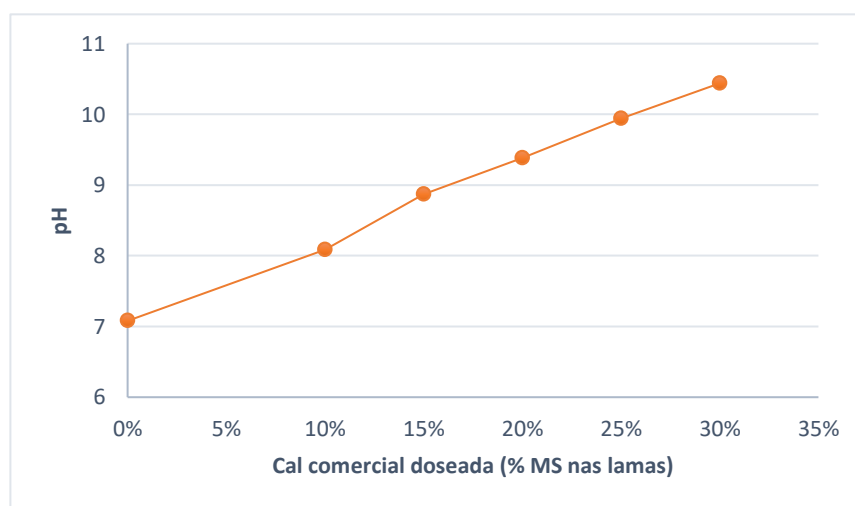


Figura 6.19- Influência da cal comercial no pH do sobrenadante.

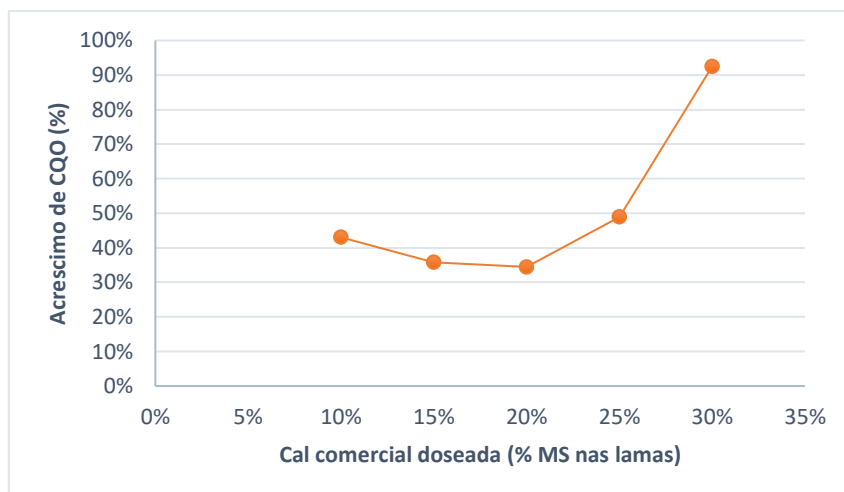


Figura 6.20-Influência da cal comercial na remoção de CQO do sobrenadante

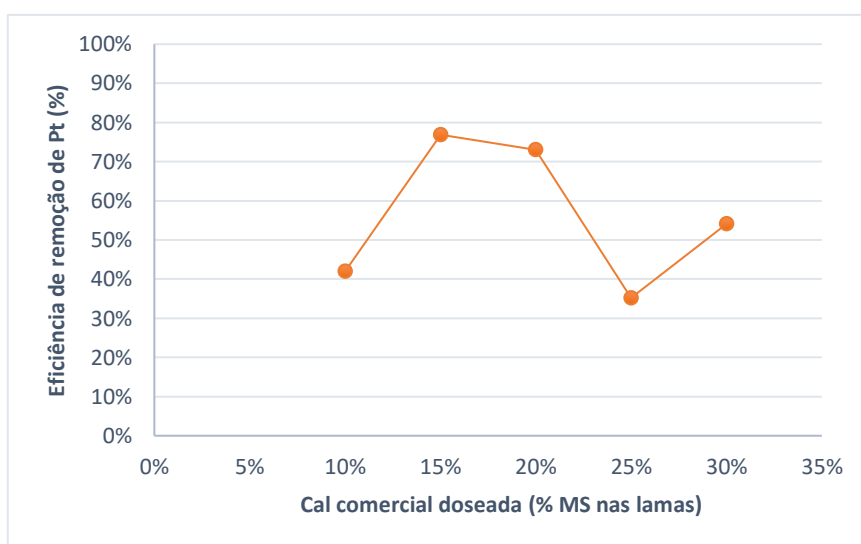


Figura 6.21-Influência da cal comercial na remoção de Pt do sobrenadante.

O doseamento de cal comercial no condicionamento de lamas primárias provoca um grande aumento do pH do sobrenadante, o que é expectável pois a cal é um reagente alcalino. O aumento entre o ensaio em branco e a dose mais elevada de cal utilizada foi de 3,36 unidades.

Ao contrário do que era expectável, o doseamento de cal comercial provocou um aumento da CQO no sobrenadante das lamas onde se verificou a tendência de quanto mais elevada for a dose de cal comercial maior é o valor de CQO obtido no sobrenadante (Figura 6.20). O valor mais elevado de CQO obtido (1295 mg O₂/L) foi para a dose de 1,02 g/L de Ca(OH)₂ (30% do peso seco), que corresponde a um aumento de 92% de CQO.

Relativamente à remoção de fósforo, o doseamento de cal comercial provocou uma diminuição do fósforo total presente no sobrenadante das lamas (Figura 6.21). A dose ideal para a remoção de fósforo

foi de 0,51 g/L de Ca(OH)_2 , onde ocorreu uma remoção de 77% do fósforo comparativamente ao ensaio sem cal comercial.

A Tabela 6.6 sintetiza as eficiências de remoção calculadas com base nas análises dos sobrenadantes obtidos nos ensaios de sedimentação (Tabela 6.5).

Tabela 6.6- Síntese dos resultados obtidos na fase 2 para as lamas primárias.

Cal comercial doseada (%)	Cal comercial doseada ($\text{gCa(OH)}_2/\text{L}$)	pH	Acréscimo de CQO (%)	Eficiência de remoção de Pt (%)
0%	0	7,1	-	-
10%	0,34	8,1	43%	42%
15%	0,51	8,9	36%	77%
20%	0,68	9,4	34%	73%
25%	0,85	9,9	49%	35%
30%	1,02	10,4	92%	54%

A caracterização das lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco resumem-se na Tabela 6.7 e o ensaio de sedimentação encontra-se na Figura 6.22.

Tabela 6.7- Caracterização das lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco utilizadas na fase 2.

Parâmetro	Unidades	Lamas
pH	-	7,2
SST	g/L	0,828
CQO	mg O_2/L	4522

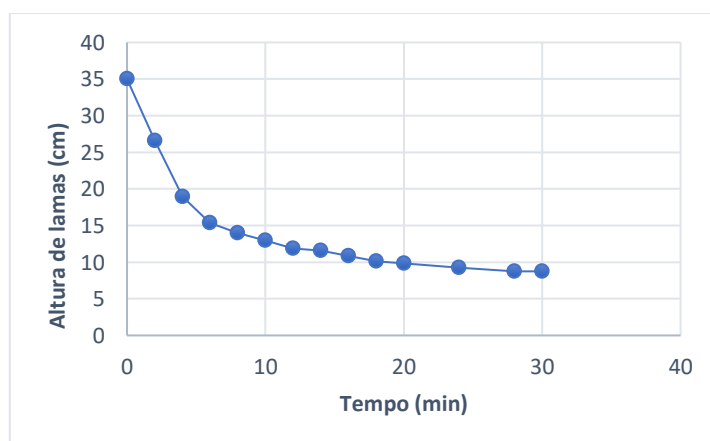


Figura 6.22-Curva de sedimentação das lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco

As doses de cal comercial utilizadas nos ensaios de sedimentação encontram-se na Tabela 5.4. Nas figuras seguintes encontram-se os resultados destes ensaios com doseamento de cal comercial (Figura 6.23 e Figura 6.24).

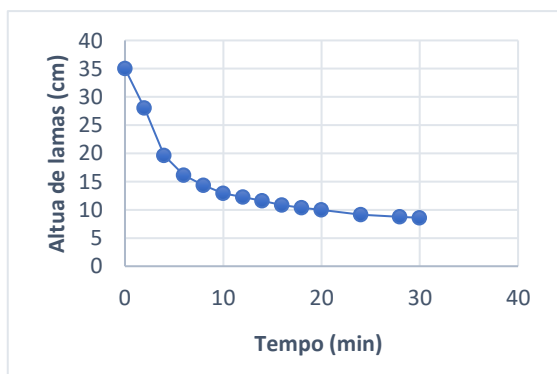


Figura 6.23- Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 10% do seu peso em cal comercial.

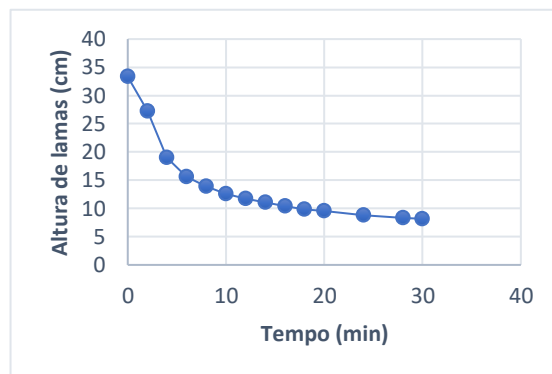


Figura 6.24- Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 15% do seu peso em cal comercial.

A adição de cal comercial nas doses utilizadas não contribuiu para a melhoria da sedimentação das lamas biológicas, sendo que as diferenças de altura inicial de lamas e final para ambas as concentrações testadas foram idênticas às obtidas no ensaio de sedimentação em branco (Figura 6.22).

Os resultados das análises ao sobrenadante recolhido após os ensaios de sedimentação resumem-se na Tabela 6.8.

Tabela 6.8- Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com cal comercial.

Cal comercial doseada (% peso seco)	Cal comercial doseada (gCa(OH) ₂ /L)	pH	Pt (mg/L)	CQO (mg O ₂ /L)
0%	0	7,2	3,84	46
10%	0,08	8,2	3,32	80
15%	0,12	8,9	3,06	54

Como referido anteriormente, o doseamento de cal comercial em condicionamento de lamas primárias provoca um grande aumento do pH do sobrenadante, o que é expectável visto que a cal é um reagente alcalino. O aumento entre o ensaio em branco e a dose mais elevada de cal utilizada foi de 1,7 unidades.

De forma idêntica aos resultados obtidos para as lamas primárias, o doseamento de cal comercial provocou um aumento de CQO no sobrenadante das lamas. O valor mais elevado de CQO obtido (79,64 mg O₂/L) foi para a dose de 0,08 g/L de Ca(OH)₂ (30% do peso seco), que corresponde a um aumento de 73% de CQO.

Relativamente à remoção de fósforo, o doseamento de cal comercial provocou uma diminuição do fósforo total presente no sobrenadante das lamas. A dose ideal para a remoção de fósforo foi de 0,12 g/L de Ca(OH)_2 , onde ocorreu uma remoção de 20% do fósforo comparativamente ao ensaio sem cal comercial.

A Tabela 6.9 resume as eficiências de remoção calculadas com base nas análises dos sobrenadantes obtidos nos ensaios de sedimentação.

Tabela 6.9- Síntese dos resultados obtidos na fase 2 para as lamas biológicas.

Cal comercial doseada (%)	Cal comercial doseada ($\text{gCa(OH)}_2/\text{L}$)	pH	Acréscimo de CQO (%)	Eficiência de remoção de Pt (%)
0%	0	7,18	-	-
10%	0,34	8,19	73%	14%
15%	0,51	8,88	14%	20%

6.3. Fase 3

A caracterização das lamas primárias da ETAR de Castelo Branco realizada no laboratório da FCT encontra-se na Tabela 6.10. O ensaio de sedimentação encontra-se na Figura 6.13.

Tabela 6.10- Caracterização das lamas primárias da ETAR de Castelo Branco utilizadas na fase 3.

Parâmetro	Unidades	Valor
pH	-	6,01
SST	g/L	4,5
SSV	g/L	0,42
CQO	$\text{mg O}_2/\text{L}$	18444
Pt	mg/L	49,3
Velocidade de sedimentação	cm/min	1,10

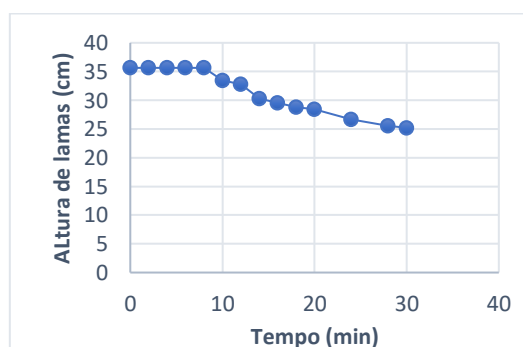


Figura 6.25- Curva de sedimentação das lamas primárias da ETAR de Castelo Branco

Nesta fase utilizaram-se os insolúveis da cal como coagulante, tendo-se avaliado a capacidade dos insolúveis para melhorar a sedimentação das lamas bem como a sua capacidade para remover SST e SSV, CQO e Pt do sobrenadante resultante da sedimentação das lamas. As doses de coagulante utilizadas encontram-se na Tabela 5.5.

Os resultados dos ensaios de sedimentação com adição de insolúveis da cal encontram-se nas figuras seguintes (Figura 6.26 até Figura 6.35).

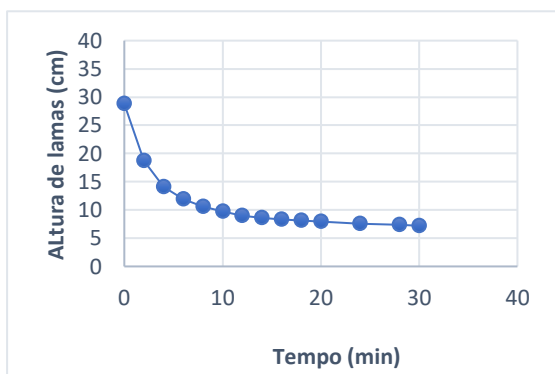


Figura 6.26- Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 100ml de insolúveis da cal.

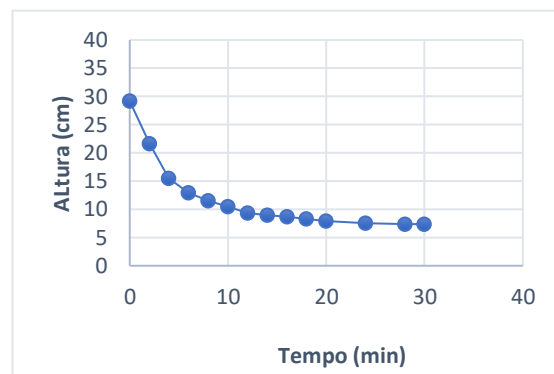


Figura 6.27-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 90ml de insolúveis da cal e respectiva diluição.

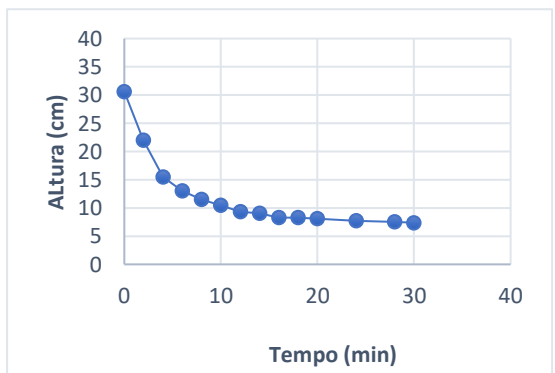


Figura 6.28-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 80ml de insolúveis da cal e respectiva diluição.

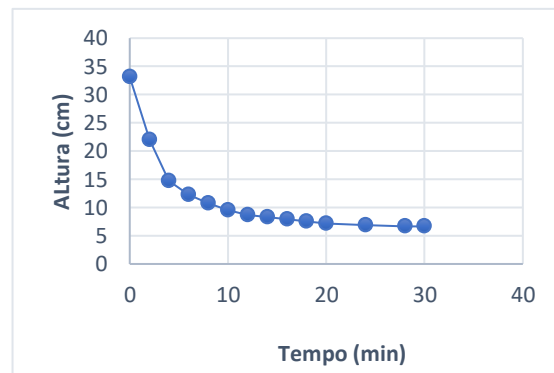


Figura 6.29-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 70ml de insolúveis da cal e respectiva diluição.

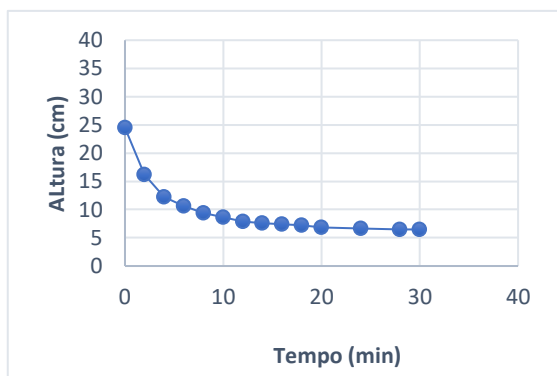


Figura 6.30-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 60ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.

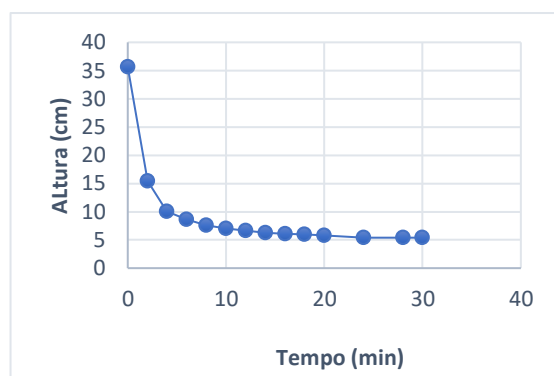


Figura 6.31-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 50ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.

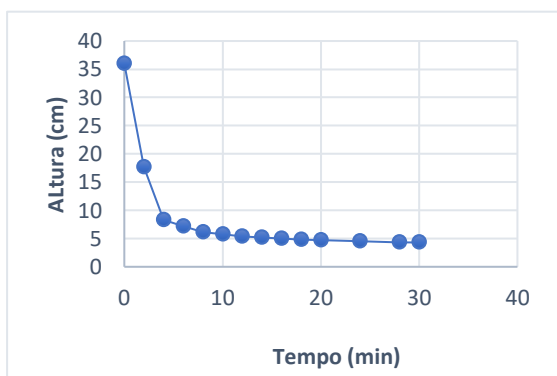


Figura 6.32-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 40ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.

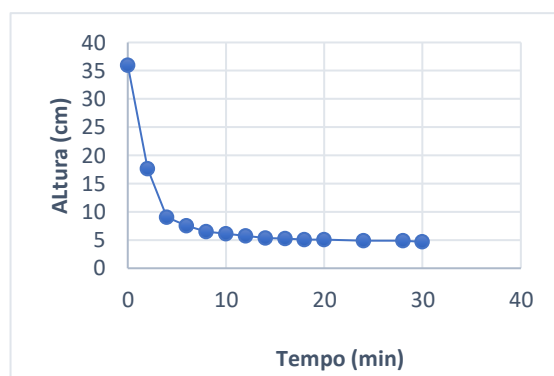


Figura 6.33-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 30ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.

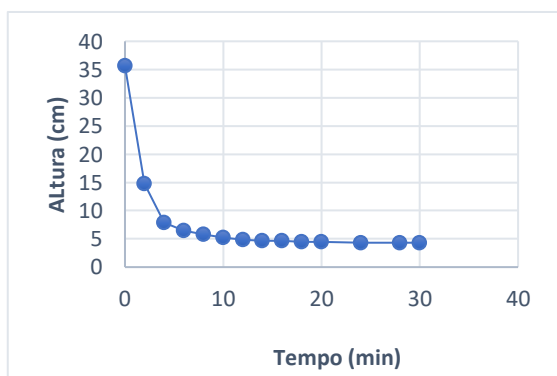


Figura 6.34-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 20ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.

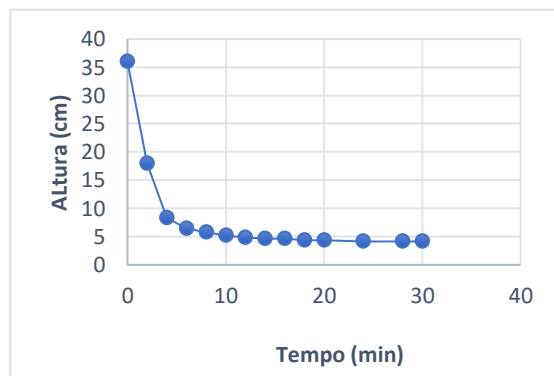


Figura 6.35-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 10ml de insolúveis da cal e respetiva diluição.

Comparativamente ao ensaio em branco (Figura 6.25) podemos observar que a adição de insolúveis da cal melhora significativamente o processo de sedimentação das lamas primárias. Nesta fase não se avaliou a diferença entre a altura final e inicial de lamas pois uma vez que os insolúveis da cal têm uma quantidade considerável de sólidos, ao dosearmos o coagulante estaríamos a inserir sólidos nas lamas pelo que a altura de sedimento final será maior quanto maior for a dose de insolúveis utilizada.

As velocidades de sedimentação calculadas para os pontos críticos das respetivas curvas de sedimentação encontram-se na Tabela 6.11.

Tabela 6.11-Velocidades de sedimentação dos ensaios sedimentação com lamas primárias condicionadas com insolúveis da cal.

Insolúveis da cal (mL)	Tempo critico (min)	Velocidade (cm/min)
100	4	2,34
90	6	3,06
80	6	3,06
70	4	3,60
60	4	1,98
50	4	2,70
40	4	4,32
30	4	4,82
20	4	3,42
10	4	4,86

Comparativamente ao ensaio em branco (Figura 6.25), o tempo critico diminui bastante. No ensaio em branco o valor foi de 14 minutos, e nos ensaios onde se utilizou insolúveis da cal o tempo critico baixou para os 6 minutos para os volumes de 90 e 80mL de insolúveis da cal e 4 minutos para os restantes volumes estudados.

A velocidade de sedimentação mais elevada foi para dose de 10ml de insolúveis da cal (Figura 6.35), onde se obteve uma velocidade de 4,86 cm/min. A dose de 60ml de coagulante (Figura 6.30) foi a que permitiu obter menor velocidade de sedimentação. Comparativamente ao ensaio em branco (Figura 6.25), todas os volumes de coagulante utilizados apresentam velocidades de sedimentação bastante maiores que o ensaio em branco, sendo que a velocidade mais elevada foi de 4,86 cm/min para o volume de 10mL de coagulante, o que representa um aumento de 286% face à velocidade do ensaio em branco (1,26 cm/min).

Os resultados das análises ao sobrenadante recolhido após os ensaios de sedimentação encontram-se na Tabela 6.12.

Tabela 6.12- Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas primárias condicionadas com insolúveis da cal.

Insolúveis da cal (mL)	pH	SST (g/L)	SVS (g/L)	CQO (mgO₂/L)	Pt (mg/L)
0	6,0	0,928	0,15	2062	39,1
100,00	12,3	0,036	0,01	1030	0,5
90,00	12,4	0,036	0,02	992	0,6
80,00	12,4	0,046	0,02	974	0,8
70,00	12,4	0,05	0,02	1030	0,9
60,00	12,4	0,055	0,03	1054	1,2
50,00	12,4	0,132	0,03	1122	2,4
40,00	12,3	0,154	0,03	1104	3,0
30,00	12,3	0,158	0,04	1202	4,2
20,00	12,1	0,165	0,04	1233	5,1
10,00	11,2	0,178	0,06	1351	10,9

Nas figuras seguintes pode-se observar a influencia do doseamento de cal comercial no valor de pH do sobrenadante (Figura 6.36), bem como na remoção de SST (Figura 6.37), SSV (Figura 6.38), CQO (Figura 6.39) e de Pt (Figura 6.40).

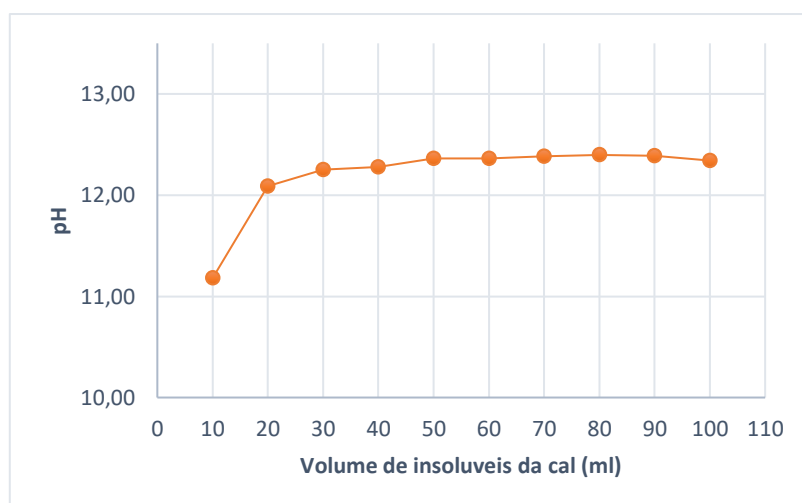


Figura 6.36-Influência dos insolúveis da cal no pH do sobrenadante.

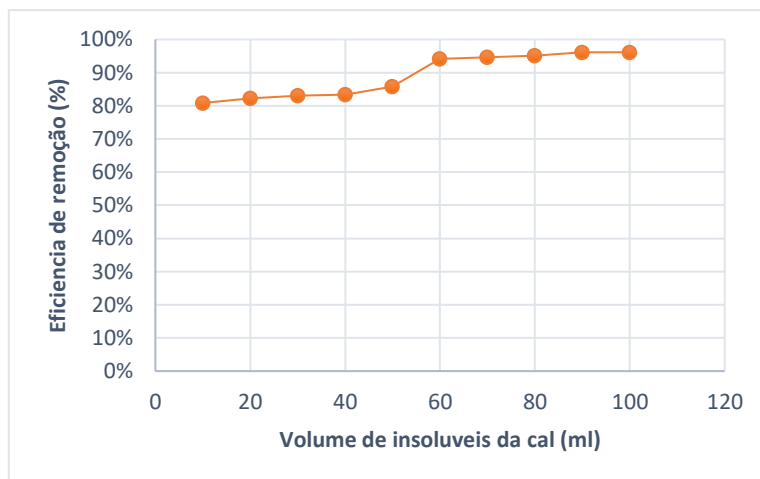


Figura 6.37-Influência dos insólúveis da cal nos SST do sobrenadante.

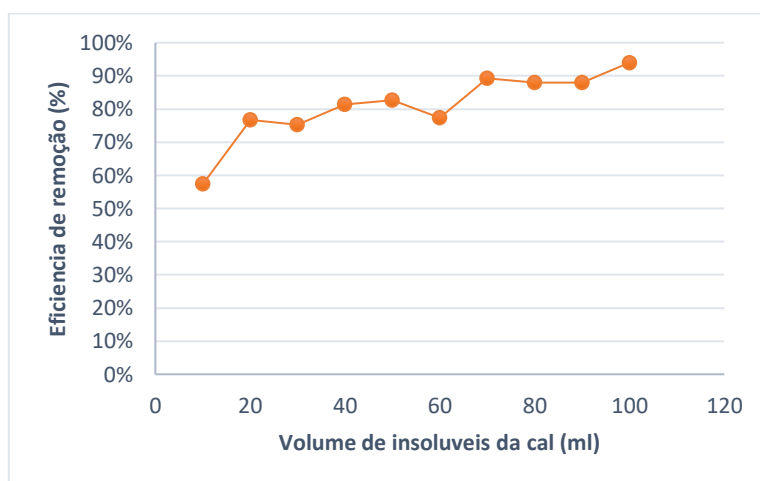


Figura 6.38-Influência dos insólúveis da cal nos SSV do sobrenadante.

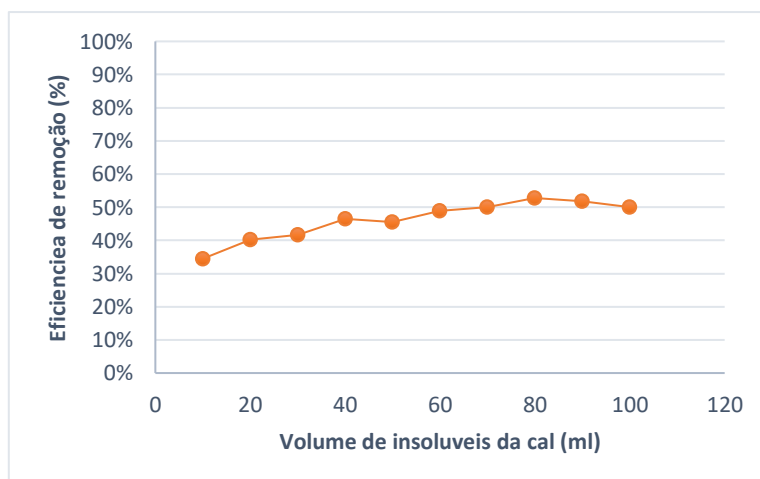


Figura 6.39-Influência dos insólúveis da cal na CQO do sobrenadante.

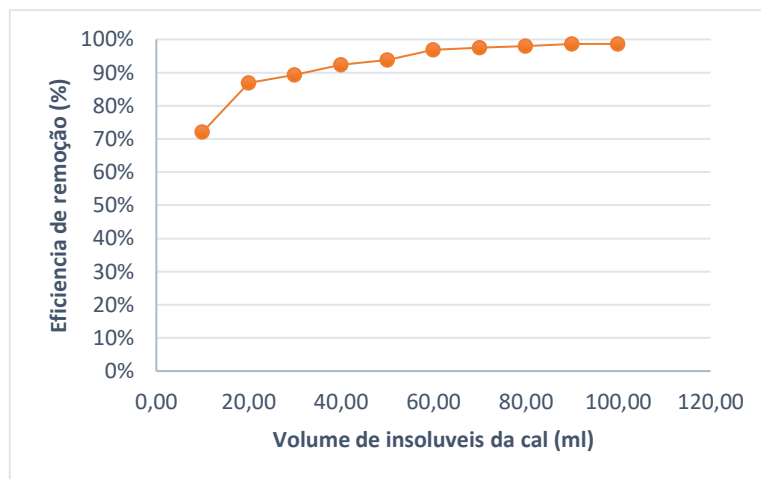


Figura 6.40-Influência dos insolúveis da cal no Pt do sobrenadante.

O doseamento de insolúveis da cal em condicionamento de lamas primárias provoca um aumento bastante elevado do pH do sobrenadante (Figura 6.36), o que era expectável visto que os insolúveis da cal são um reagente alcalino maioritariamente constituído por cálcio. O aumento entre o ensaio em branco e a dose mais elevada de cal utilizada foi de 6,39 unidades.

Relativamente aos SST (Figura 6.37), com o doseamento de insolúveis de cal conseguiu-se sempre reduções do conteúdo de sólidos do sobrenadante superiores a 80%. As eficiências de remoção aumentam com o aumento do volume de insolúveis da cal doseados, conseguindo-se obter eficiências de 96% nos ensaios onde se doseou 100 e 90mL de insolúveis. Para os SSV (Figura 6.38), as eficiências obtidas também aumentam conforme o aumento de insolúveis doseados. A eficiência mínima obtida foi de 57% para o volume de 10ml de coagulante e a eficiência máxima obtida foi de 94% para os 100 mL.

Em termos de eficiência de remoção da CQO do sobrenadante, com os volumes de insolúveis da cal testados conseguiu-se uma redução máxima de 53% quando se doseou 80 ml de coagulante e uma redução mínima quando se doseou 10ml de coagulante (Figura 6.39).

Relativamente à remoção de fósforo, a redução verifica-se maior quanto maior é a dose de coagulante (Figura 6.40). O doseamento de insolúveis permitiu obter eficiências de remoção acima de 70%, conseguindo-se obter eficiências de 99% para as doses de 100 e 90mL de insolúveis da cal. A eficiência mínima (72%) verifica-se para a dose de 10mL de insolúveis da cal.

A Tabela 6.13 resume as eficiências de remoção calculadas com base nas análises dos sobrenadantes obtidos nos ensaios de sedimentação (Tabela 6.12).

Tabela 6.13-Síntese dos resultados obtidos na fase 3 com doseamento de insolúveis da cal.

VOLUME de insolúveis da cal (mL)	EFICIÊNCIA de remoção de SST (%)	EFICIÊNCIA de remoção de SSV (%)	EFICIÊNCIA de remoção de CQO (%)	EFICIÊNCIA de remoção de Pt (%)
100	96%	94%	50%	99%
90	96%	88%	52%	99%
80	95%	88%	53%	98%
70	95%	89%	50%	98%
60	94%	77%	49%	97%
50	86%	83%	46%	94%
40	83%	81%	46%	92%
30	83%	75%	42%	89%
20	82%	77%	40%	87%
10	81%	57%	34%	72%

De maneira a comparar a eficiência dos insolúveis da cal relativamente à cal comercial, converteram-se as doses de insolúveis em cal comercial e procedeu-se aos ensaios (Tabela 5.6).

Os resultados dos ensaios de sedimentação com a cal comercial encontram-se nas figuras seguintes (Figura 6.41 até Figura 6.50).

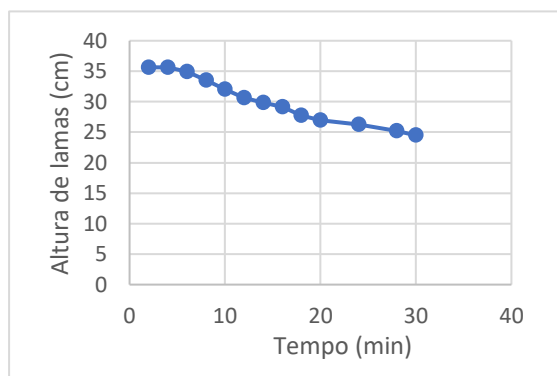


Figura 6.41-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 103,59 mg/L de cal comercial.

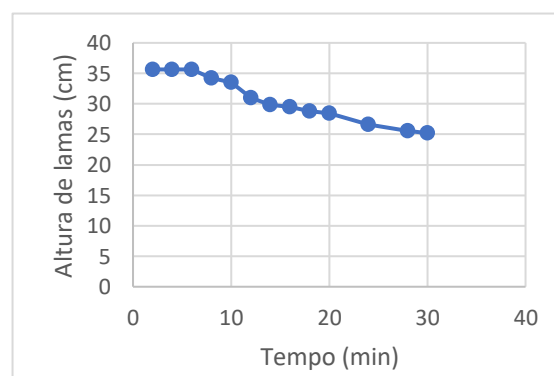


Figura 6.42-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 93,23 mg/L de cal comercial.

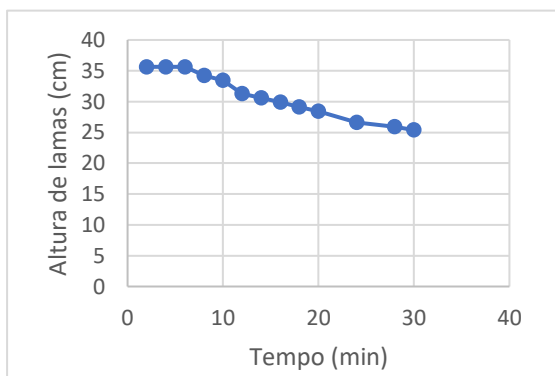


Figura 6.43-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 82,87 mg/L de cal comercial.

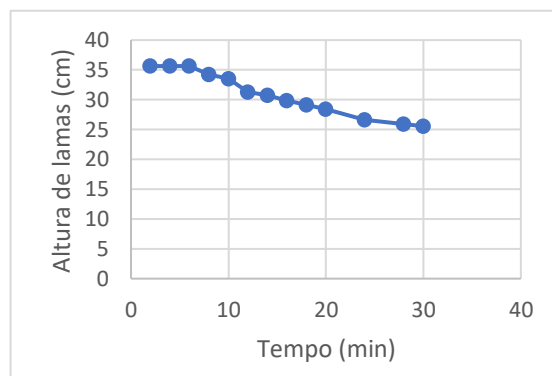


Figura 6.44-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 72,51 mg/L de cal comercial.

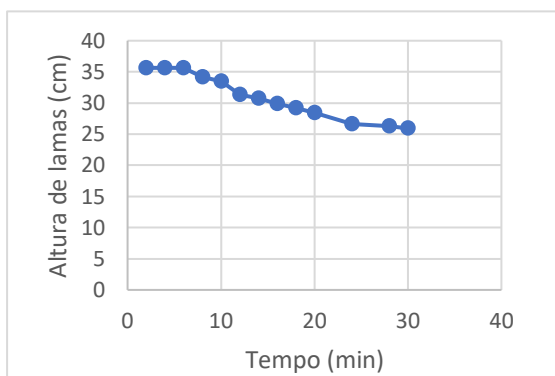


Figura 6.45-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 62,16 mg/L de cal comercial.

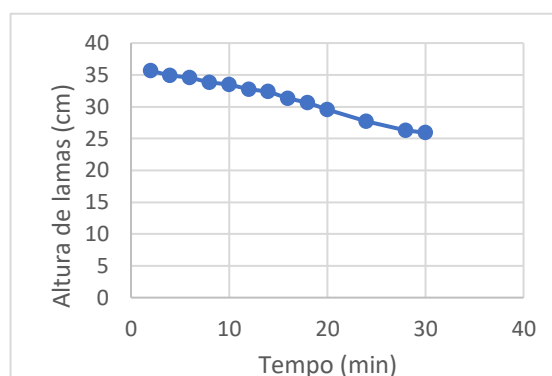


Figura 6.46-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 51,80 mg/L de cal comercial.

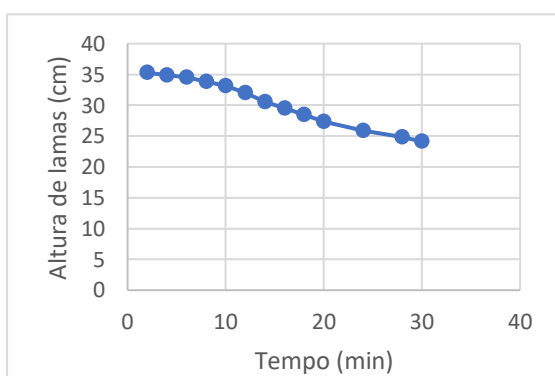


Figura 6.48-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 41,44 mg/L de cal comercial.

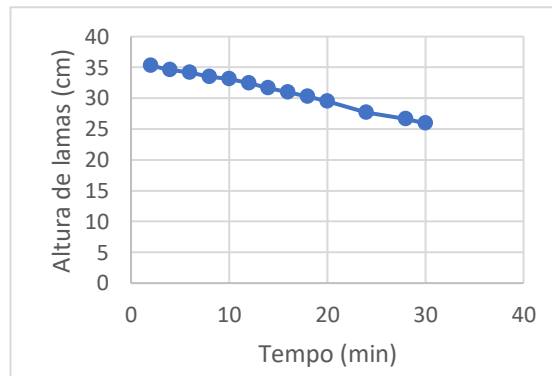


Figura 6.47-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 31,08 mg/L de cal comercial.

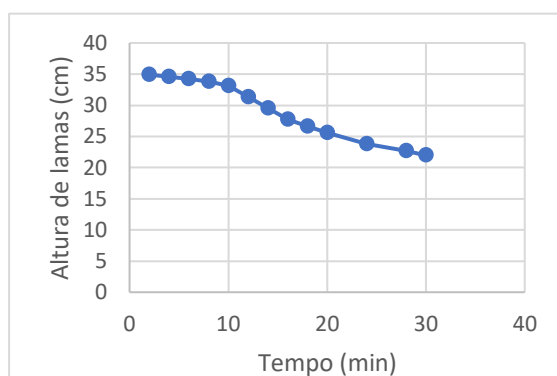


Figura 6.49-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 20,72 mg/L de cal comercial.

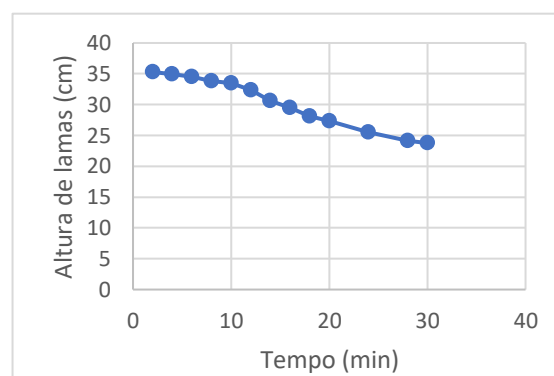


Figura 6.50-Curva de sedimentação de lamas primárias condicionadas com 10,36 mg/L de cal comercial.

Em comparação com os ensaios com os insolúveis da cal, o doseamento de cal comercial não se revelou eficaz na melhoria da sedimentação das lamas estudadas visto que as doses utilizadas nestes ensaios foram mínimas. Inclusive foi bastante difícil distinguir o sobrenadante durante os ensaios pois este tinha uma turvação bastante elevada, pelo que a leitura feita com auxílio de uma lanterna por trás da proveta para se conseguir fazer a distinção.

As velocidades de sedimentação, calculadas para os pontos críticos das respetivas curvas de sedimentação, resumem-se na Tabela 6.14.

Tabela 6.14-Velocidades de sedimentação dos ensaios sedimentação com lamas primárias condicionadas com cal comercial.

Insolúveis da cal (mL)	Cal comercial (mg/L)	Tempo crítico (min)	Velocidade (cm/min)
100	103,59	12	1,26
90	93,23	12	1,26
80	82,87	12	1,08
70	72,51	12	1,08
60	62,16	12	1,08
50	51,80	-	-
40	41,44	14	0,72
30	31,08	-	-
20	20,72	16	0,90
10	10,36	14	0,90

O doseamento de cal comercial nas doses utilizadas nesta fase não mostrou ser eficaz na melhoria da sedimentação das lamas estudadas. O tempo crítico não seguiu uma tendência, variando entre os 12 e os 16 minutos. As doses de 51,80 mg/L e 31,08 mg/L não tiveram efeito nas lamas uma vez que a sedimentação só ocorreu por compressão, impossibilitando assim a determinação do tempo crítico e da velocidade de sedimentação. As diferenças de velocidade de sedimentação entre o ensaio sem doseamento e os ensaios com doseamento foram mínimas, sendo que a aumento máximo foi de 15% para as doses de 103,59 mg/L e 93,23 mg/L. As restantes doses não tiveram efeito na velocidade de sedimentação, chegando a obter-se velocidades de sedimentação inferiores à obtida no ensaio em branco.

Na Tabela 6.15 resumem-se os resultados das análises ao sobrenadante recolhido após os ensaios de sedimentação.

Tabela 6.15- Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas primárias condicionadas com cal comercial.

Insolúveis da cal (mL)	Cal comercial (mg/L)	pH	SST (g/L)	SVS (g/L)	CQO (mgO₂/L)	Pt (mg/L)
0	0	6	0,928	0,15	2062	39,1
100	103,59	6,9	0,48	0,13	1689	33,2
90	93,23	6,8	0,52	0,04	1796	34,5
80	82,87	6,8	0,57	0,05	1796	34,5
70	72,51	6,7	0,53	0,04	1618	34,9
60	62,16	6,7	0,46	0,08	1831	34,1
50	51,80	6,7	0,57	0,10	1846	38,7
40	41,44	6,4	0,61	0,10	1883	40,1
30	31,08	6,3	0,79	0,07	1957	40,8
20	20,72	6,2	0,54	0,05	1994	39,3
10	10,36	6,2	0,55	0,04	1957	40,1

Nas figuras seguintes pode-se observar a influencia do doseamento de cal comercial no valor de pH do sobrenadante (Figura 6.51), bem como na remoção de SST (Figura 6.52), SSV (Figura 6.53), CQO (Figura 6.54) e de Pt (Figura 6.55).

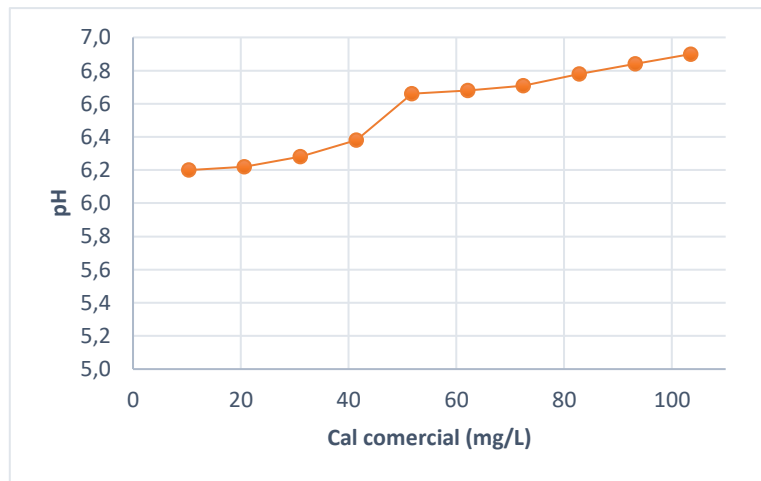


Figura 6.51-Influência da cal comercial no pH do sobrenadante.

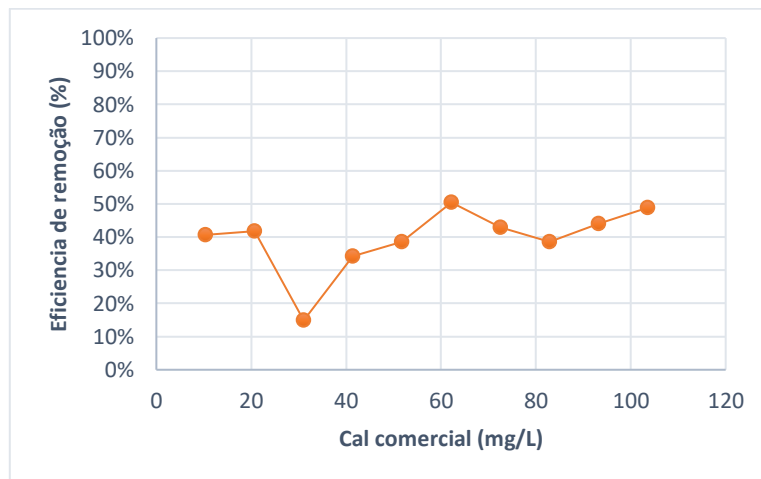


Figura 6.52-Influência da cal comercial nos SST do sobrenadante.

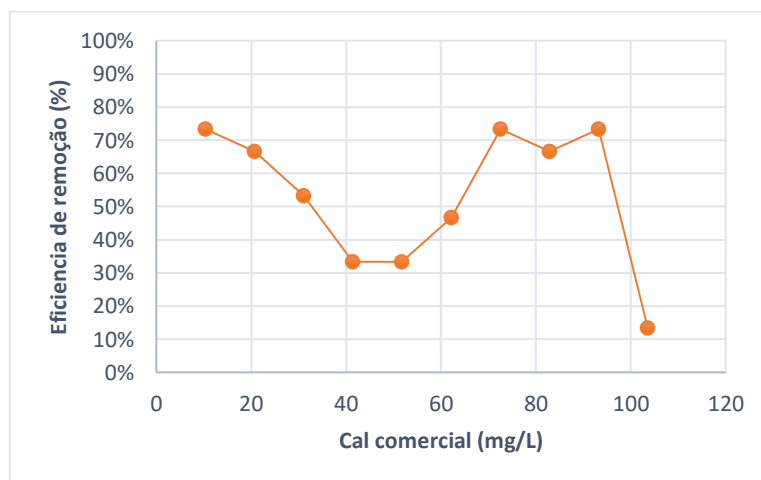


Figura 6.53-Influência da cal comercial nos SSV do sobrenadante.

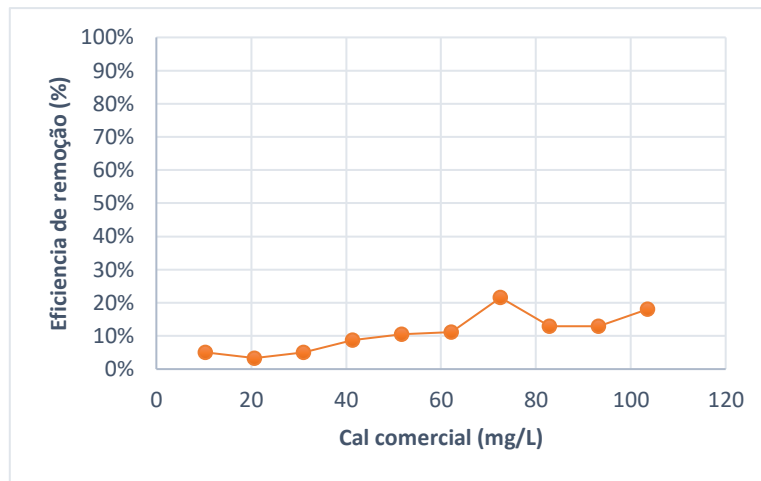


Figura 6.54-Influência da cal comercial na CQO do sobrenadante.

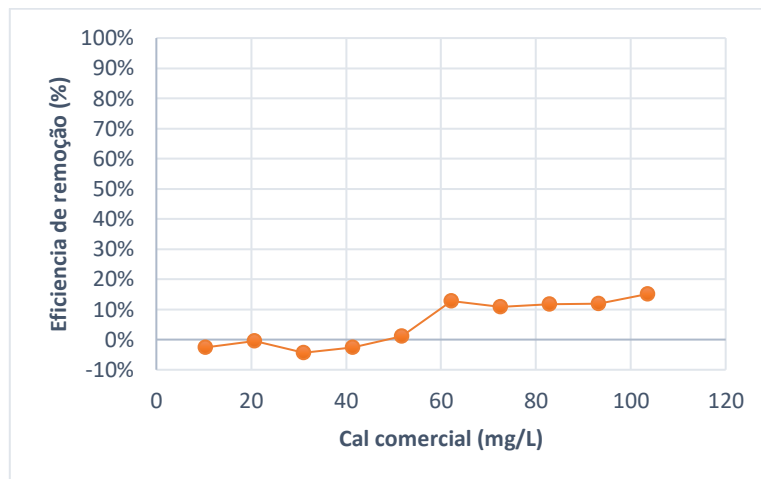


Figura 6.55-Influência da cal comercial no Pt do sobrenadante.

O doseamento de cal comercial nas doses utilizadas não provocou grandes alterações no pH do sobrenadante, que registou valores maiores quanto maior a dose de cal utilizada. A diferença de pH entre o sobrenadante com a dose mais elevada e o sobrenadante sem doseamento de coagulante foi de 0,9 unidades (Figura 6.51).

Relativamente aos SST (Figura 6.52), o doseamento de cal nas doses utilizadas permitiu reduzir a quantidade de sólidos presente no sobrenadante até 50% quando se doseou 62,16 mg/L de cal comercial. A eficiência de remoção mínima obtida foi de 15% quando doseado 31,08 mg/L de cal. Para os SSV (Figura 6.53), a remoção dos mesmos foi bastante díspar com os valores a variar entre os 73%, para as doses 93,23 mg/L, 72,51 mg/L e 10,36 mg/L de cal comercial, e os 13% para a dose mais elevada (103,59 mg/L).

Para a CQO (Figura 6.54) e para o fósforo (Figura 6.55) ao doseamento de cal não se revelou particularmente eficaz na sua remoção.

Na Tabela 6.16 estão sintetizadas as eficiências de remoção calculadas com base nas análises dos sobrenadantes obtidos nos ensaios de sedimentação (Tabela 6.15).

Tabela 6.16-Síntese dos resultados obtidos na fase 3 com doseamento de cal comercial.

Insolúveis da cal (mL)	Cal comercial (mg/L)	Eficiência de remoção dos SST (%)	Eficiência de remoção dos SSV (%)	Eficiência de remoção da CQO (%)	Eficiência de remoção dos Pt (%)
100,00	103,59	49%	13%	18%	15%
90,00	93,23	44%	73%	13%	12%
80,00	82,87	39%	67%	13%	12%
70,00	72,51	43%	73%	22%	11%
60,00	62,16	50%	47%	11%	13%
50,00	51,80	39%	33%	10%	1%
40,00	41,44	34%	33%	9%	-
30,00	31,08	15%	53%	5%	-
20,00	20,72	42%	67%	3%	-
10,00	10,36	41%	73%	5%	-

6.4. Fase 4

A caracterização das lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco estudadas nesta fase e que foi realizada no laboratório da FCT encontra-se na Tabela 6.17. O ensaio de sedimentação encontra-se na Figura 6.56.

Tabela 6.17-Characterização das lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco utilizadas na fase 4.

Parâmetro	Unidades	Valor
pH	-	7,2
SST	g/L	0,065
SSV	g/L	0,052
CQO	mg O ₂ /L	308
Pt	mg/L	2,37
Velocidade de sedimentação	cm/min	5,76

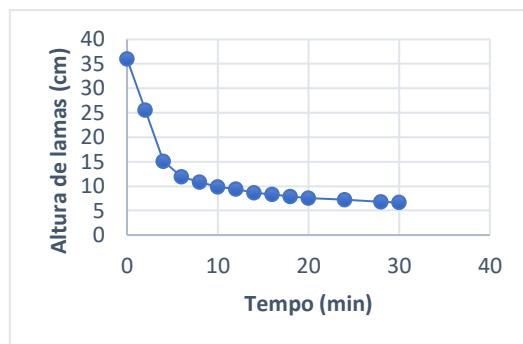


Figura 6.56- Curva de sedimentação das lamas biológicas da ETAR de Castelo Branco.

Nesta fase, à semelhança da fase 3, utilizaram-se os insolúveis da cal como coagulante, tendo-se avaliado a capacidade dos insolúveis para melhorar a sedimentação das lamas bem como a sua capacidade para remover SST e SSV, CQO e Pt do sobrenadante resultante da sedimentação das lamas. As doses de coagulante utilizadas são apresentadas na Tabela 5.5.

Os resultados dos ensaios de sedimentação com adição de insolúveis da cal encontram-se nas figuras seguintes (Figura 6.57 até Figura 6.66).

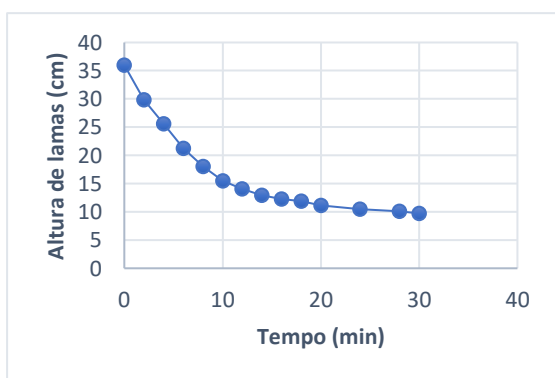


Figura 6.57-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 100ml de insolúveis da cal.

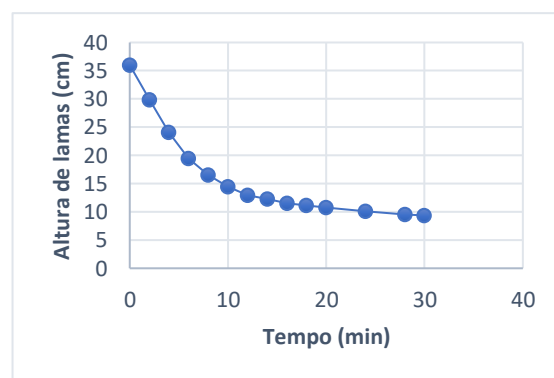


Figura 6.58-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 90ml de insolúveis da cal.

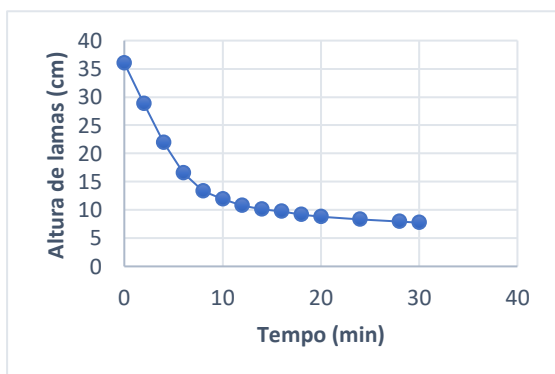


Figura 6.59-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 80ml de insolúveis da cal.

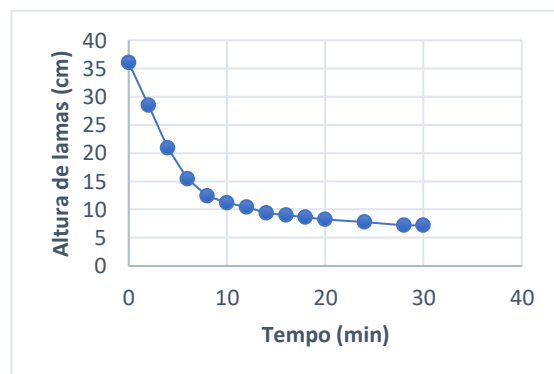


Figura 6.60-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 70ml de insolúveis da cal.

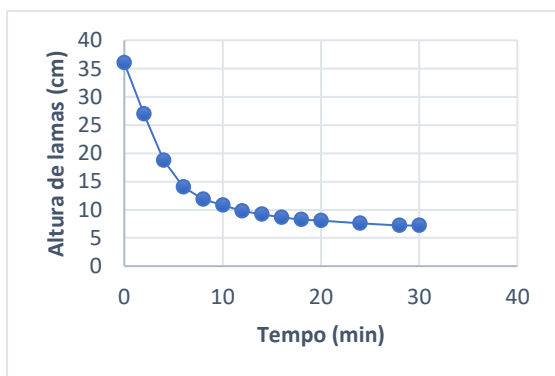


Figura 6.61-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 60ml de insolúveis da cal.

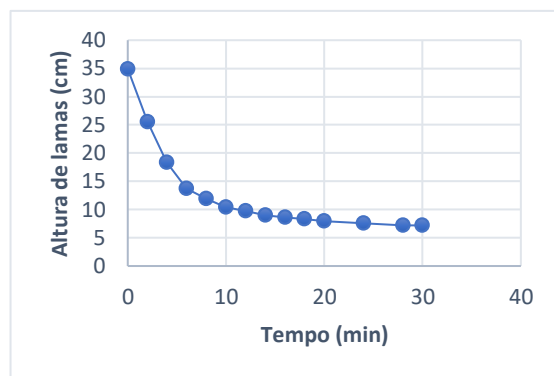


Figura 6.62-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 50ml de insolúveis da cal.

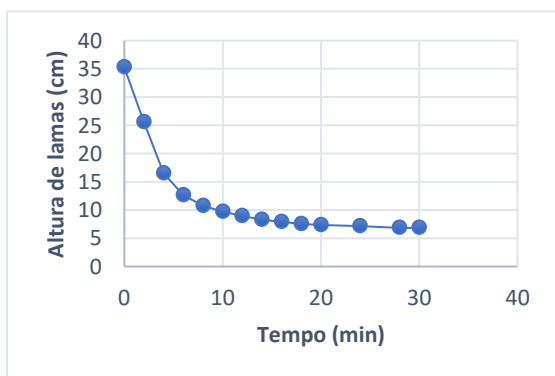


Figura 6.63-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 40ml de insolúveis da cal.

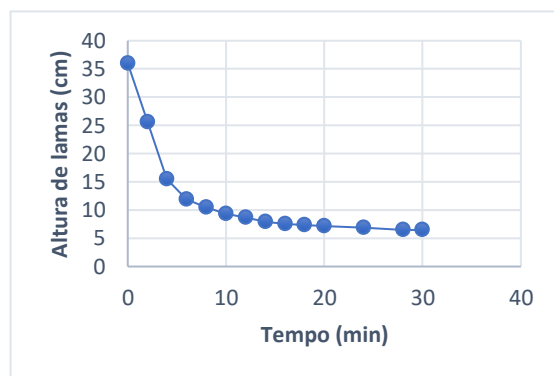


Figura 6.64-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 60ml de insolúveis da cal.

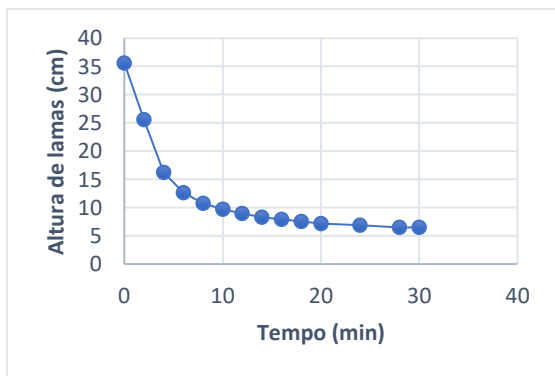


Figura 6.65-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 20ml de insolúveis da cal.

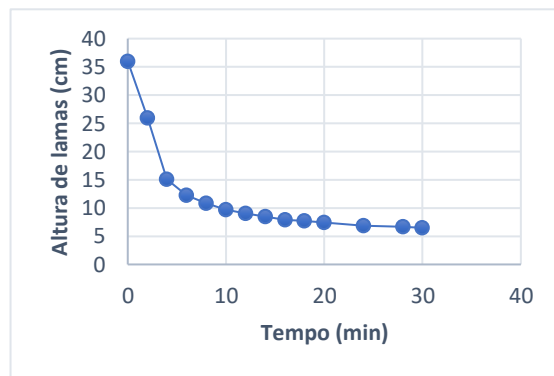


Figura 6.66-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 10ml de insolúveis da cal.

Comparativamente ao ensaio em branco (Figura 6.25) observa-se que a adição de insolúveis da cal não produziu efeitos na melhora da sedimentabilidade das lamas biológicas, uma vez que não se observa grandes diferenças entre as Figura 6.57 até Figura 6.66, e o ensaio em branco. Os insolúveis da cal contêm uma elevada quantidade de sólidos, o que faz com que a altura de lamas no final do ensaio de sedimentação seja maior para volumes mais elevados de coagulante.

Este aspeto é confirmado pelos resultados apresentados na Tabela 6.18, onde a única melhoria observada foi mínima (5,88), o que representa um aumento de 2% na velocidade de sedimentação quando comparada com a do ensaio em branco.

Tabela 6.18-Velocidades de sedimentação dos ensaios sedimentação com lamas biológicas condicionadas com insolúveis da cal.

Insolúveis da cal (mL)	Tempo critico (min)	Velocidade (cm/min)
100	10	1,87
90	8	2,70
80	8	3,11
70	8	3,08
60	6	4,92
50	6	4,38
40	6	5,16
30	6	5,64
20	6	5,28
10	6	5,88

Na Tabela 6.19 resumem-se os resultados das análises ao sobrenadante recolhido após os ensaios de sedimentação.

Tabela 6.19-Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com insolúveis da cal.

Insolúveis da cal (mL)	pH	SST (g/L)	SVS (g/L)	CQO (mgO₂/L)	Pt (mg/L)
0	7,2	0,065	0,052	308	2,37
100,00	12,3	0,035	0,033	176	0,15
90,00	12,4	0,063	0,028	176	0,16
80,00	12,3	0,045	0,044	132	0,12
70,00	12,3	0,043	0,041	220	0,12
60,00	12,2	0,050	0,034	264	0,15
50,00	12,2	0,031	0,027	108	0,17
40,00	12,2	0,026	0,022	108	0,17
30,00	12,1	0,028	0,020	90	0,19
20,00	12,1	0,034	0,025	126	0,23
10,00	11,9	0,032	0,026	108	0,31

Nas figuras seguintes pode-se observar a influência do doseamento de cal comercial no valor de pH do sobrenadante (Figura 6.67), bem como na remoção de SST (Figura 6.68), SSV (Figura 6.69), CQO (Figura 6.69) e de Pt (Figura 6.71).

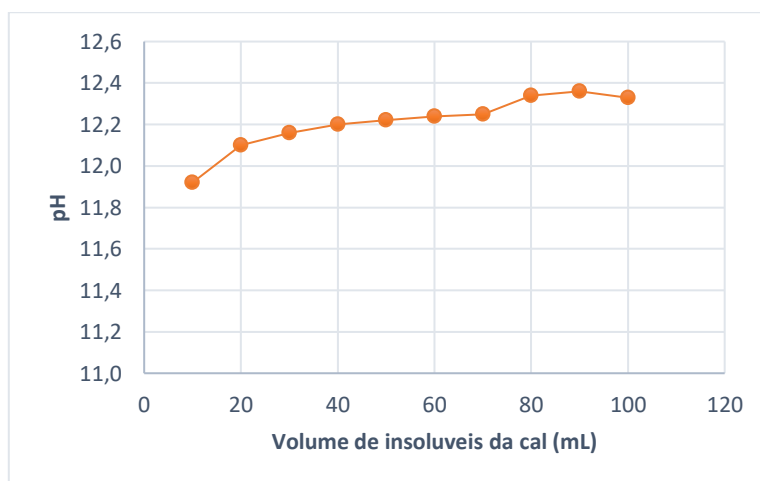


Figura 6.67- Influência dos insolúveis da cal no pH do sobrenadante.

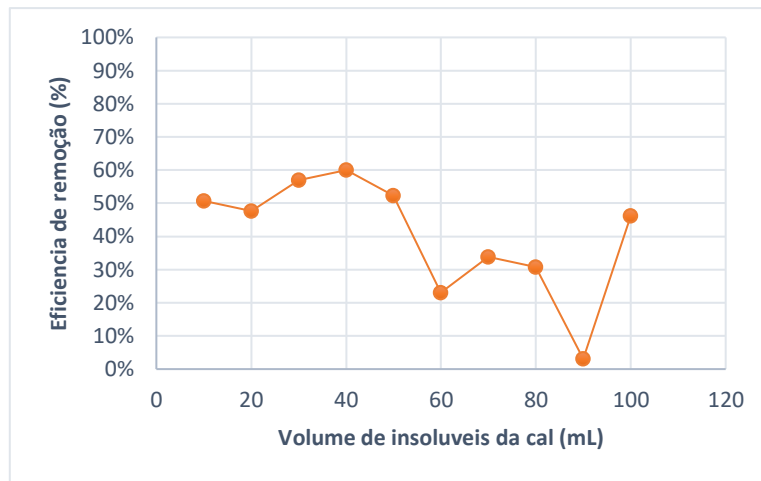


Figura 6.68-Influência dos insólúveis da cal nos SST do sobrenadante.

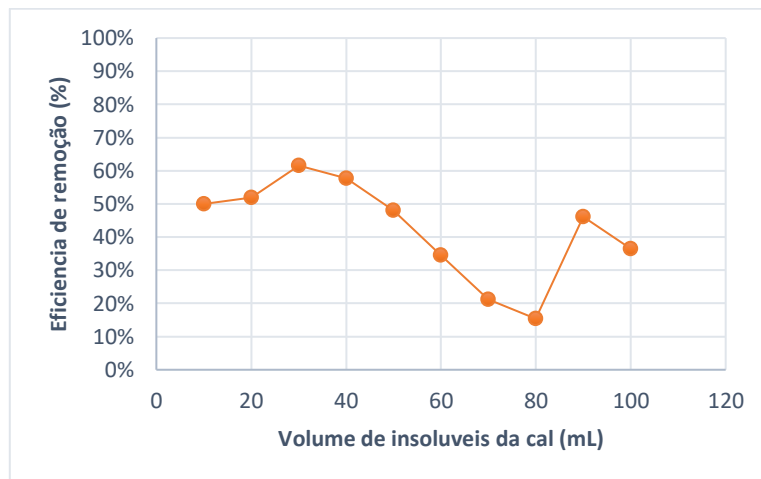


Figura 6.69-Influência dos insólúveis da cal nos SSV do sobrenadante.

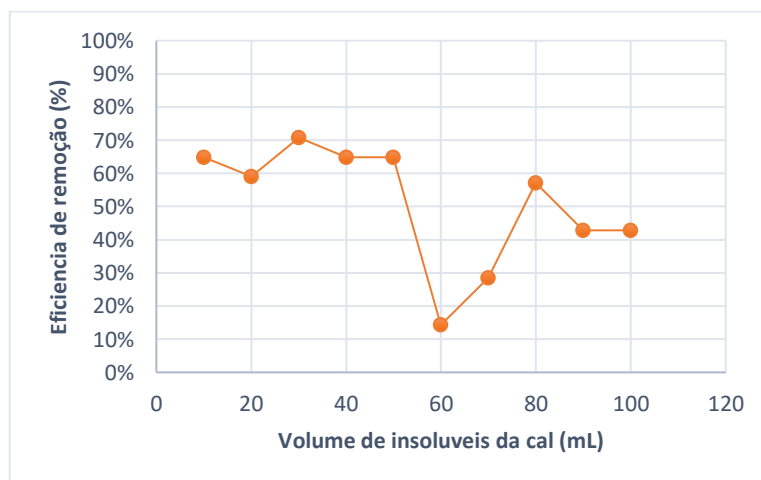


Figura 6.70-Influência dos insólúveis da cal na CQO do sobrenadante.

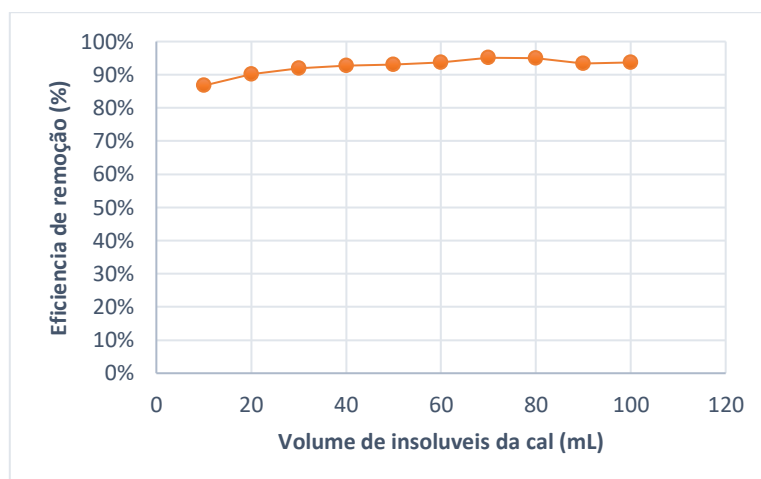


Figura 6.71-Influência dos insolúveis da cal no Pt do sobrenadante.

O doseamento de insolúveis da cal em condicionamento de lamas biológicas provoca um aumento exponencial do pH do sobrenadante (Figura 6.67), o que era expectável visto que os insolúveis da cal são um reagente alcalino maioritariamente constituído por cálcio. A diferença mais elevada entre o pH do sobrenadante resultante do ensaio em branco e o pH do sobrenadante resultante dos ensaios de sedimentação em que se adicionou insolúveis da cal foi de 5,16 unidades, para o volume doseado de 90mL.

Relativamente aos SST (Figura 6.68), o doseamento de insolúveis da cal nas doses utilizadas permitiu reduzir a quantidade de sólidos presente no sobrenadante até 60%. A eficiência de remoção mínima obtida foi de 3% quando doseado 90 mL de insolúveis. Relativamente aos SSV (Figura 6.69), a remoção dos mesmos foi bastante díspar com os valores a variar entre os 62 os 15%. Tanto para os SST como para os SSV, as doses mais baixas de coagulante (50, 40, 30, 20 e 10 mL) foram as que obtiveram melhores eficiências.

Em termos de eficiência de remoção da CQO os resultados foram bastante dispares, sendo que a eficiência máxima obtida foi de 71% quando se doseou 30mL de insolúveis de cal, e a mínima de 14% quando se doseou 60mL de insolúveis. À semelhança dos SST e dos SSV, as dosagens mais baixas obtiveram melhores eficiências de remoção.

A remoção de fósforo foi quase total em todas as dosagens de coagulante, sendo que a eficiência mínima obtida (87%) foi para a dose de 10mL (Figura 6.71)

Na Tabela 6.20 resumem-se as eficiências de remoção calculadas com base nas análises dos sobrenadantes obtidos nos ensaios de sedimentação (Tabela 6.19).

Tabela 6.20-Síntese dos resultados obtidos na fase 4 com doseamento de insolúveis da cal.

Insolúveis da cal (mL)	Eficiência de remoção dos SST (%)	Eficiência de remoção dos SSV (%)	Eficiência de remoção da CQO (%)	Eficiência de remoção dos Pt (%)
100,00	46%	37%	43%	94%
90,00	3%	46%	43%	93%
80,00	31%	15%	57%	95%
70,00	34%	21%	29%	95%
60,00	23%	35%	14%	94%
50,00	52%	48%	65%	93%
40,00	60%	58%	65%	93%
30,00	57%	62%	71%	92%
20,00	48%	52%	59%	90%
10,00	51%	50%	65%	87%

À semelhança da fase 3, também nesta fase se converteram as doses de insolúveis da cal utilizadas em cal comercial de modo a poder comparar as eficiências de cada um dos coagulantes. As doses de cal encontram-se na Tabela 5.6.

Os resultados dos ensaios de sedimentação podem ser observados nas figuras seguintes (Figura 6.72 até Figura 6.81).

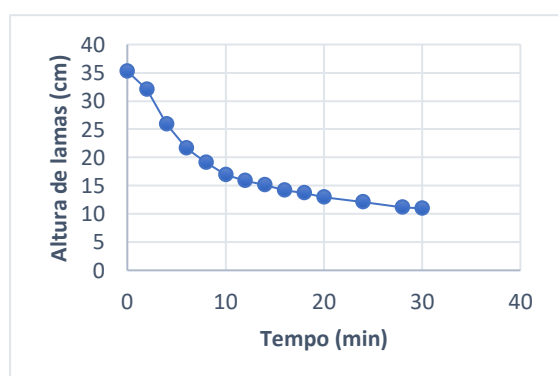


Figura 6.72-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 103,59 mg/L de cal comercial.

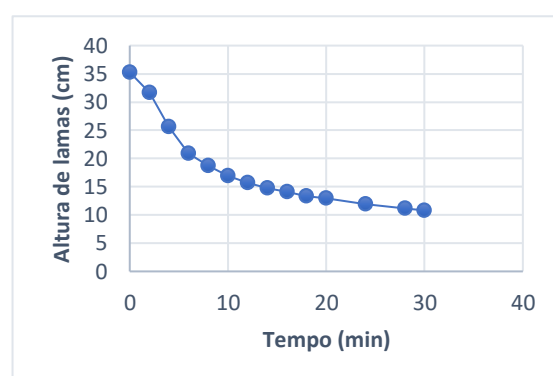


Figura 6.73-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 93,23 mg/L de cal comercial.

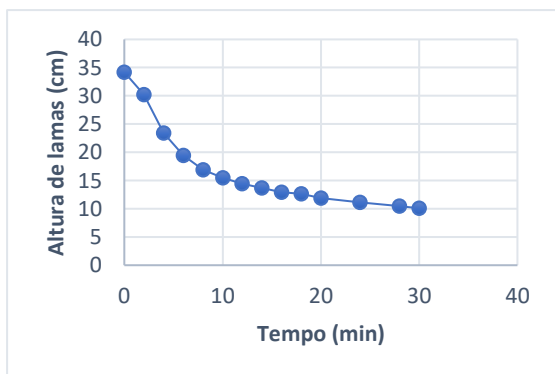


Figura 6.74-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 82,87 mg/L de cal comercial.

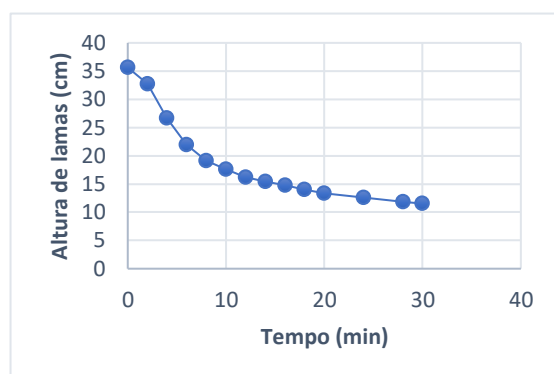


Figura 6.75-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 75,51 mg/L de cal comercial.

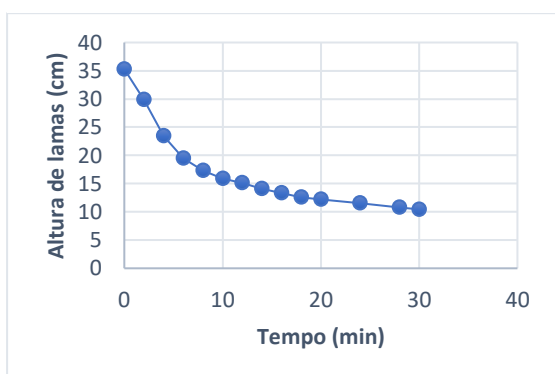


Figura 6.77--Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 62,16 mg/L de cal comercial.

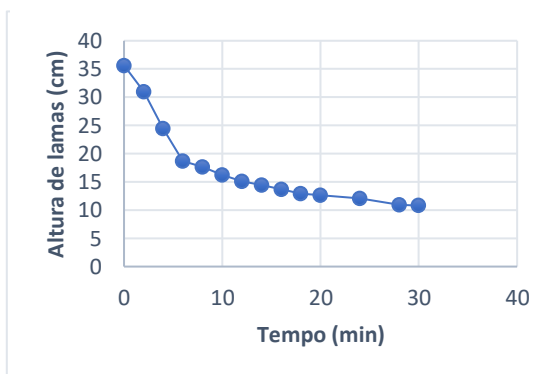


Figura 6.76-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 51,80 mg/L de cal comercial.

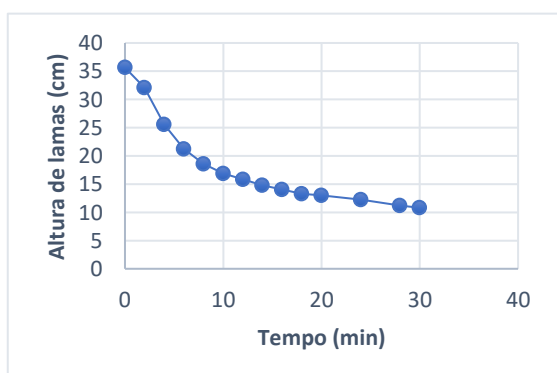


Figura 6.78-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 41,44 mg/L de cal comercial.

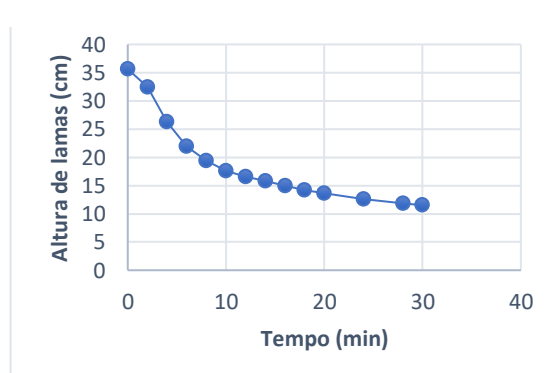


Figura 6.79-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 31,08 mg/L de cal comercial.

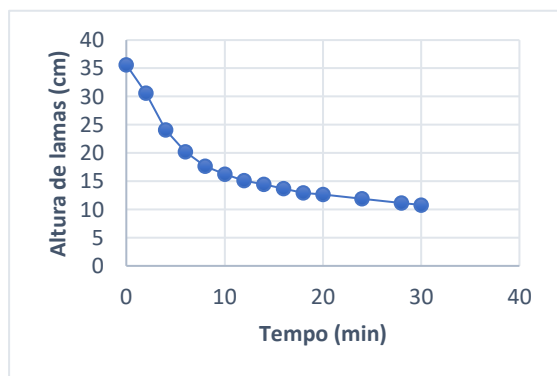


Figura 6.80-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 20,72 mg/L de cal comercial.

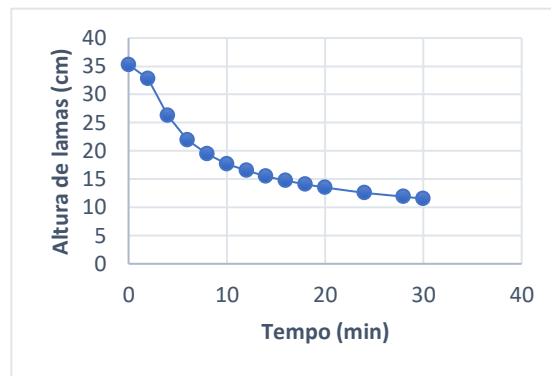


Figura 6.81-Curva de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com 10,36 mg/L de cal comercial.

À semelhança do que aconteceu nos ensaios de sedimentação com insolúveis de cal, o doseamento de cal comercial nas quantidades estudadas não obteve qualquer efeito positivo na sedimentabilidade das lamas, tendo-se obtido para todas as dosagens velocidades de sedimentação inferiores às do ensaio em branco (Tabela 6.21).

Tabela 6.21-Velocidades de sedimentação dos ensaios sedimentação com lamas biológicas condicionadas com cal comercial.

Insolúveis da cal (mL)	Cal comercial (mg/L)	Tempo crítico (min)	Velocidade (cm/min)
100	103,59	10	2,48
90	93,23	8	2,61
80	82,87	8	1,26
70	72,51	6	2,88
60	62,16	6	3,90
50	51,80	8	2,70
40	41,44	8	2,50
30	31,08	8	2,48
20	20,72	8	2,30
10	10,36	8	2,47

Na Tabela 6.22 resumem-se os resultados das análises ao sobrenadante recolhido após os ensaios de sedimentação.

Tabela 6.22-Resultados da análise aos sobrenadantes dos ensaios de sedimentação de lamas biológicas condicionadas com cal comercial.

Insolúveis da cal (mL)	Cal comercial (mg/L)	pH	SST (g/L)	SVS (g/L)	CQO (mgO ₂ /L)	Pt (mg/L)
0	0	7,20	0,065	0,052	308,26	2,37
100	103,59	8,60	0,02	0,01	161,50	0,95
90	93,23	8,39	0,03	0,00	161,50	0,90
80	82,87	8,29	0,02	0,02	143,55	0,91
70	72,51	8,14	0,03	0,01	143,55	0,90
60	62,16	8,09	0,02	0,01	125,61	0,90
50	51,80	7,86	0,07	0,00	161,50	0,86
40	41,44	7,74	0,03	0,01	143,55	0,82
30	31,08	7,49	0,03	0,01	161,50	0,80
20	20,72	7,42	0,03	0,01	179,44	0,74
10	10,36	7,24	0,02	0,02	143,55	0,82

Nas figuras seguintes pode-se observar a influência do doseamento de cal comercial no valor de pH do sobrenadante (Figura 6.82), bem como na remoção de SST (Figura 6.83), SSV (Figura 6.84), CQO (Figura 6.85) e de Pt (Figura 6.86).

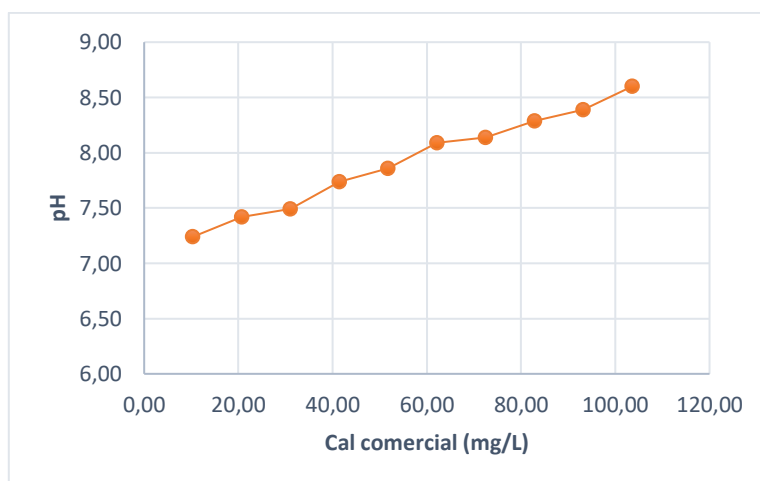


Figura 6.82-Influência da cal comercial no pH do sobrenadante.

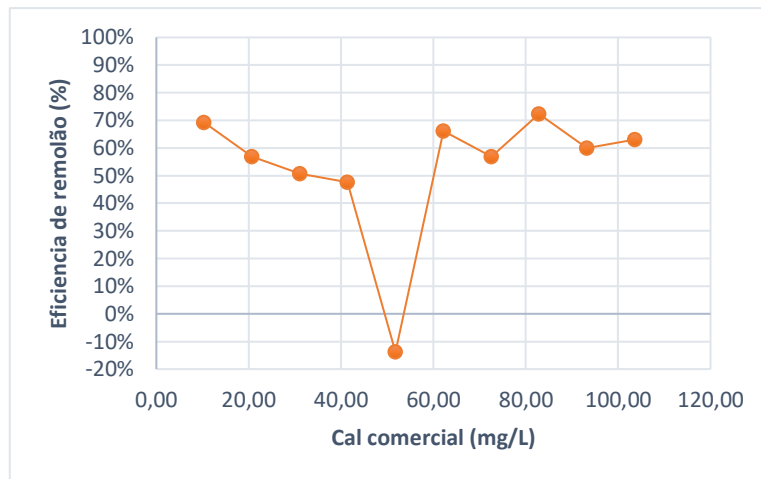


Figura 6.83-Influência da cal comercial nos SST do sobrenadante.

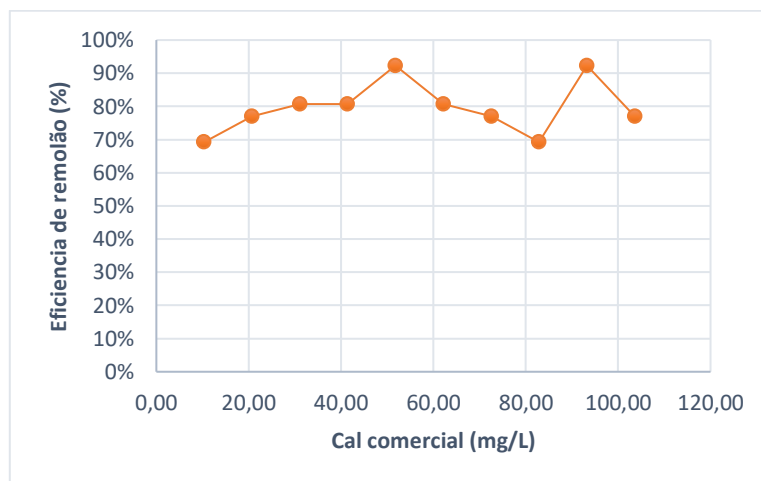


Figura 6.84-Influência da cal comercial nos SSV do sobrenadante.

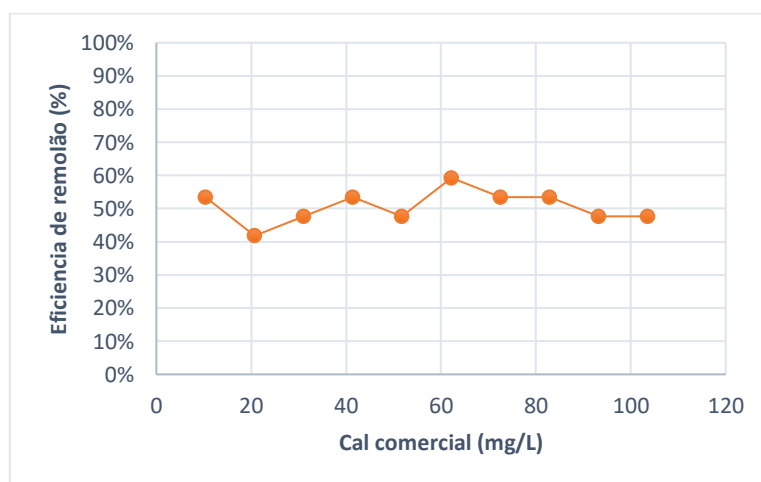


Figura 6.85-Influência da cal comercial na CQO do sobrenadante.

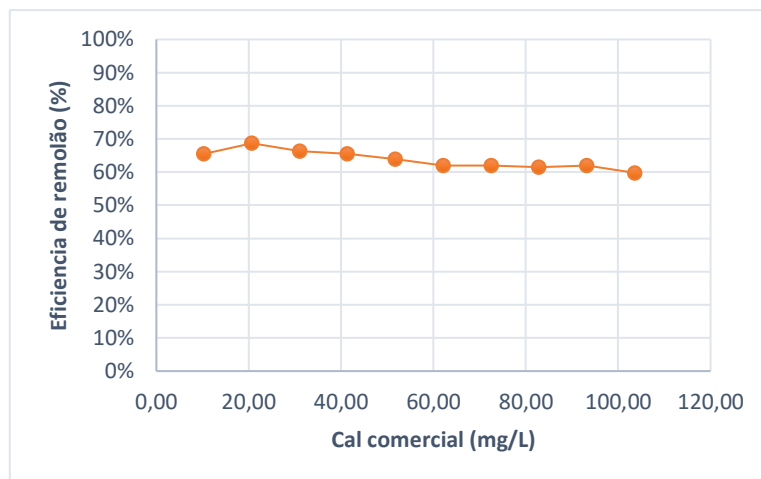


Figura 6.86-Influência da cal comercial no Pt do sobrenadante.

O doseamento de cal comercial nas doses utilizadas provocou um aumento do pH do sobrenadante, que registou valores maiores quanto maior a dose de cal utilizada. A diferença de pH entre o sobrenadante com a dose mais elevada e o sobrenadante sem doseamento de coagulante foi de 1,4 unidades (Figura 6.82).

No que se refere aos SST (Figura 6.83), o doseamento de cal nas quantidades utilizadas permitiu reduzir a quantidade de sólidos presente no sobrenadante até 72% quando se doseou 82,87 mg/L de cal comercial. Para os 51,80 mg/L de coagulante doseado foram colhidos mais sólidos no sobrenadante do que os recolhidos no ensaio em branco. Isto poderá dever-se a um erro na colheita do sobrenadante para análise, onde poderá ter-se colhido um floco que não tinha sedimentado pelo que influenciou o resultado dos SST.

Relativamente aos SSV (Figura 6.84), o doseamento de cal provou ser eficaz na sua redução. Os valores de eficiência de remoção foram superiores a 75% em todas as dosagens aplicadas, sendo que o valor máximo obtido foi de 92% para a dose 93,23 mg/L e 51,80 mg/L de cal comercial.

Em termos de redução da CQO o doseamento de cal também foi eficaz, onde a eficácia mínima foi de 42% para a dose de 20,72 mg/L, e a máxima de 59% para a dose de 62,16 mg/L.

As eficiências de remoção de fósforo foram constantes entre as diferentes dosagens, onde o valor máximo de eficiência foi de 69% para os 20,72 mg/L e o valor mínimo de 60% para os 103,59 mg/L.

Na Tabela 6.23 resumem-se as eficiências de remoção calculadas com base nas análises dos sobrenadantes obtidos nos ensaios de sedimentação.

Tabela 6.23-Síntese dos resultados obtidos na fase 4 com doseamento de cal comercial.

Insolúveis da cal (mL)	Cal comercial (mg/L)	Eficiência de remoção dos SST (%)	Eficiência de remoção dos SSV (%)	Eficiência de remoção da CQO (%)	Eficiência de remoção dos Pt (%)
100,00	103,59	63%	77%	48%	60%
90,00	93,23	60%	92%	48%	62%
80,00	82,87	72%	69%	53%	61%
70,00	72,51	57%	77%	53%	62%
60,00	62,16	66%	81%	59%	62%
50,00	51,80	-	92%	48%	64%
40,00	41,44	48%	81%	53%	66%
30,00	31,08	51%	81%	48%	66%
20,00	20,72	57%	77%	42%	69%
10,00	10,36	69%	69%	53%	66%

6.5. Análise comparativa

Nas figuras seguintes são comparados os diferentes resultados obtidos entre os dois coagulantes utilizados nas várias lamas, relativamente à velocidade de sedimentação (Figura 6.87 e Figura 6.88), e às eficiências de remoção de SST (Figura 6.89), de SSV (Figura 6.90), de CQO (Figura 6.92) e de Pt (Figura 6.91).

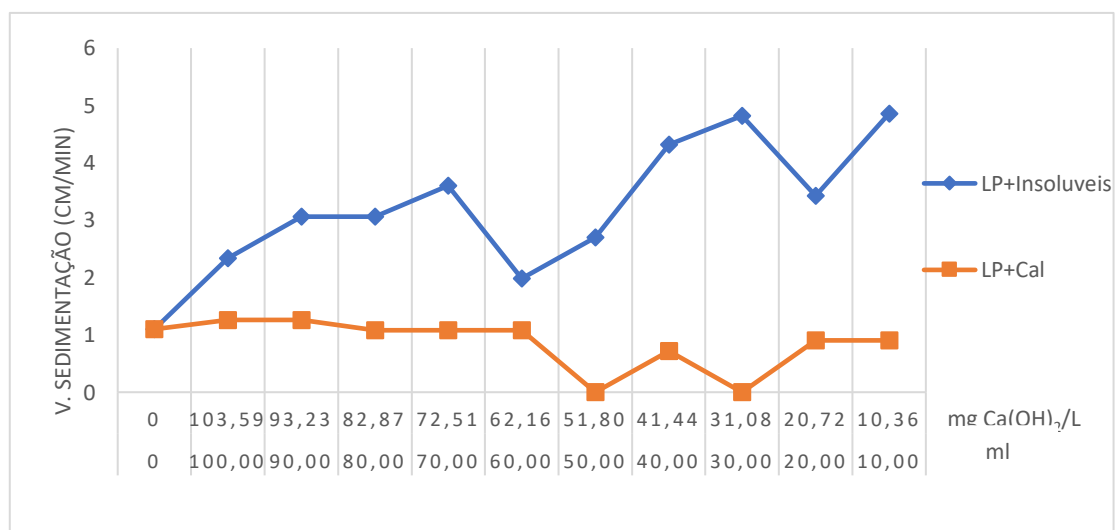


Figura 6.87-Influência dos coagulantes em estudo na velocidade de sedimentação das lamas primárias.

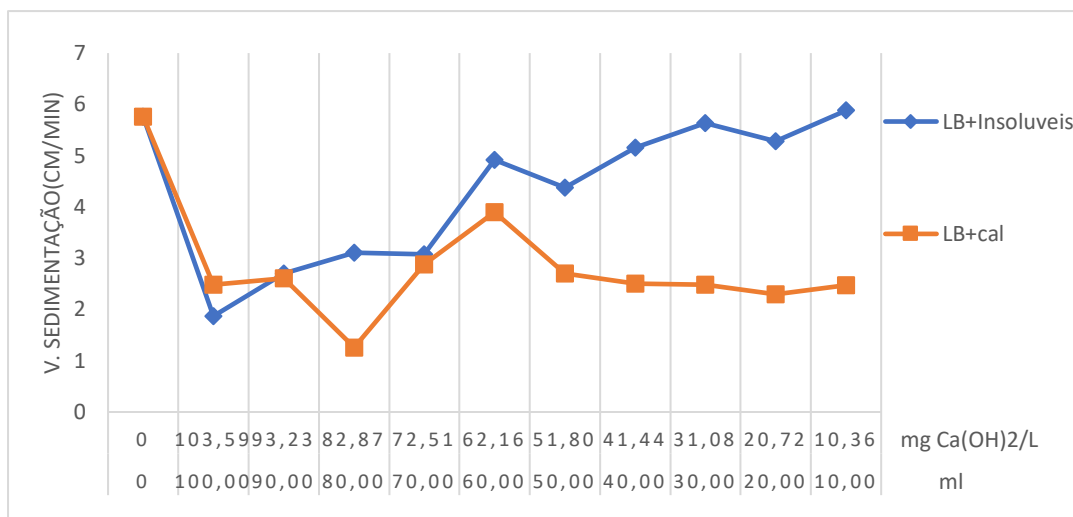


Figura 6.88-Influência dos coagulantes em estudo na velocidade de sedimentação das lamas biológicas.

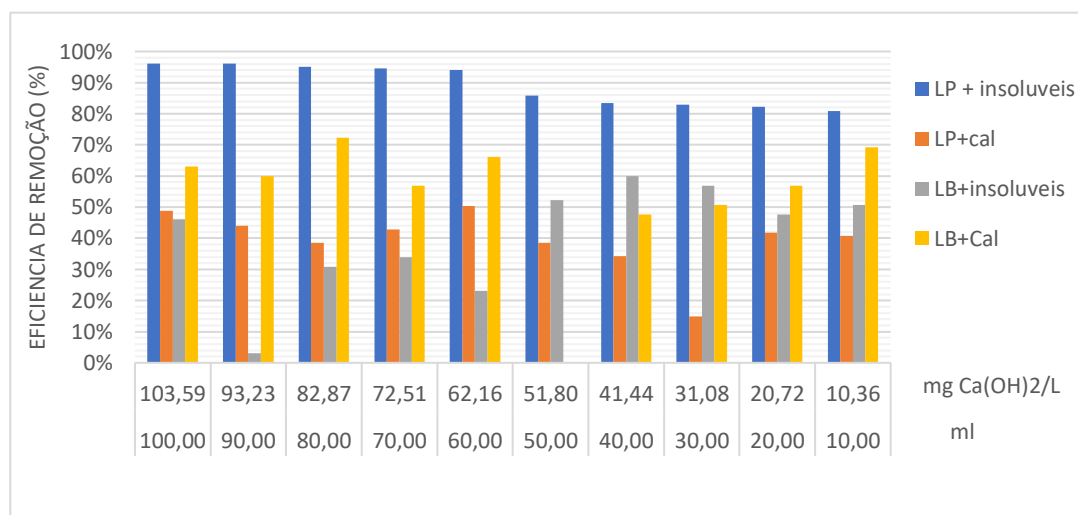


Figura 6.89-Influência dos coagulantes em estudo na remoção de SST do sobrenadante das várias lamas analisadas.

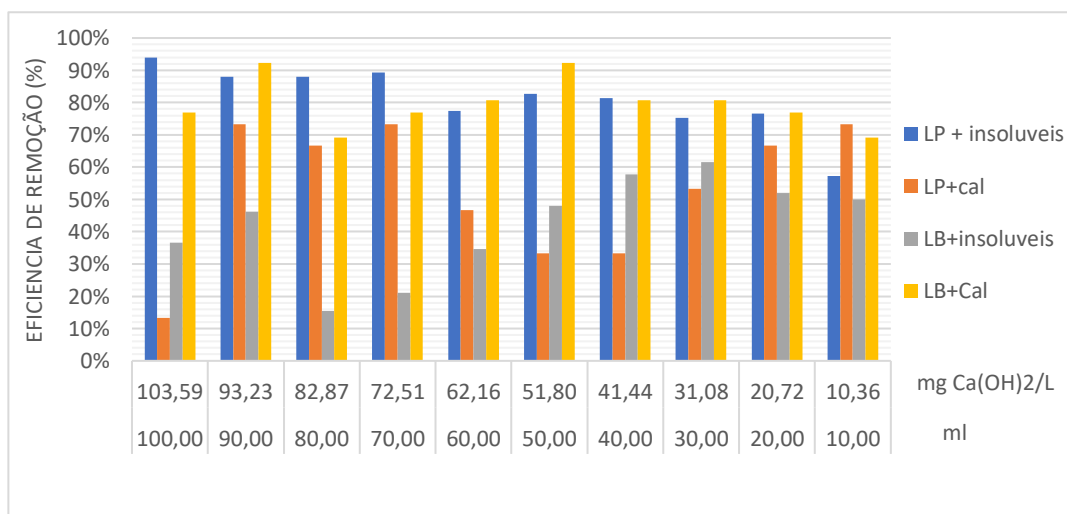


Figura 6.90-Influência dos coagulantes em estudo na remoção de SSV do sobrenadante das várias lamas analisadas.

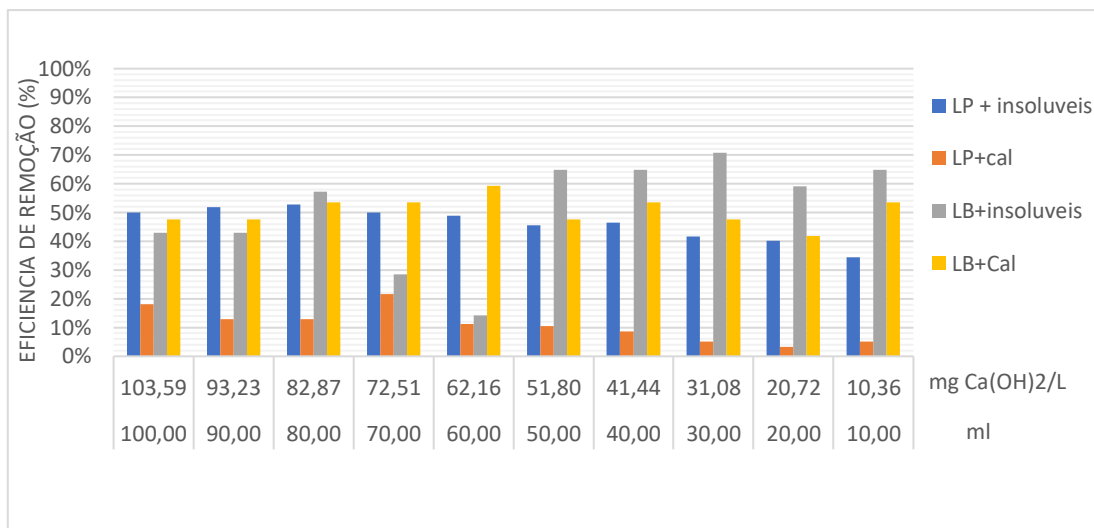


Figura 6.92-Influência dos coagulantes em estudo na remoção da CQO do sobrenadante das várias lamas analisadas

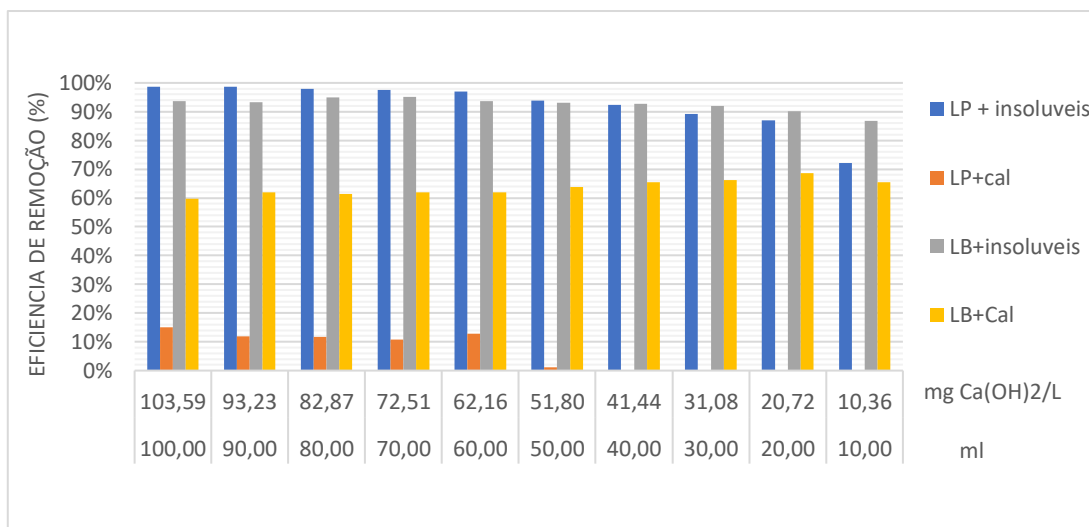


Figura 6.91-Influência dos coagulantes em estudo na remoção de Pt do sobrenadante das várias lamas analisadas

O doseamento de insolúveis da cal em lamas primárias mostrou-se mais eficaz na melhoria da velocidade de sedimentação das lamas do que o doseamento de cal comercial (Figura 6.87). As doses de 40, 30 e 10 mL de insolúveis de cal foram as que permitiram um maior efeito na velocidade de sedimentação destas lamas. Por outro lado, o doseamento de cal não se mostrou particularmente eficaz na melhoria da sedimentação destas lamas, uma vez que as velocidades obtidas para as doses utilizadas foram todas muito semelhantes à do ensaio em branco.

Relativamente às lamas biológicas, nenhum dos coagulantes mostrou ser eficaz na melhoria da velocidade de sedimentação das mesmas (Figura 6.88).

Relativamente à remoção de SST (Figura 6.89), o doseamento de insolúveis da cal mostrou ser mais eficaz nas lammas primárias, obtendo-se valores acima dos 90% de remoção quando doseado acima de 60 mL. Para doses inferiores a remoção variou entre 81 e 86%. O doseamento de cal foi menos eficaz na remoção de SST, sendo que a eficiência de remoção máxima obtida foi de 50% quando doseados 62,16 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{L}$.

No que respeita às biológicas o doseamento de insolúveis obteve piores desempenhos na remoção de SST do que o doseamento de cal comercial, onde as eficiências de remoção variam entre 23 e 60% quando doseados insolúveis e entre 48 e 72% quando doseada cal comercial.

Relativamente à remoção de SSV nas lammas primárias o doseamento de insolúveis da cal funcionou melhor que a cal comercial, permitindo a obtenção de eficiências superiores a 75% em todas as dosagens, à exceção da dose de 10 mL, onde se obteve uma eficiência de remoção de 57% (Figura 6.90),. A eficiência máxima obtida no doseamento de cal comercial foi de 73% para as doses 72,51 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{L}$ e 10,36 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{L}$.

À semelhança do que ocorreu com os SST, nas lammas biológicas o doseamento de insolúveis não permitiu obter eficiências de remoção de SSV superiores às obtidas quando doseada cal comercial.

A eficiência de remoção de CQO foi bastante diferente quando doseados insolúveis da cal em lammas primárias, comparativamente ao doseamento de cal comercial (Figura 6.92). As eficiências de remoção para os insolúveis variam entre 34 e 53%, já a eficiência máxima de remoção obtida quando doseada cal comercial foi de 22% para a dose de 72,51 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{L}$.

Nas lammas biológicas para as doses entre 60-100 mL de insolúveis (62,16-103,59 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{L}$), a utilização de cal comercial obteve maior eficiência de remoção de CQO. As maiores eficiências de remoção verificaram-se nas doses mais baixas de insolúveis (10-50 mL)

Relativamente à remoção de fósforo nos dois tipos de lammas estudados (Figura 6.91), o doseamento de insolúveis da cal permitiu obter resultados bastante melhores que o doseamento de cal comercial, onde as eficiências de remoção obtidas variam entre 72 e 99% para as lammas primárias, e entre 87 e 95% para as lammas biológicas.

7. Conclusões

As principais conclusões do trabalho efetuado incluem:

- A utilização do coagulante em estudo foi benéfica para a sedimentação das lamas primárias. Isto deve-se à elevada concentração de sólidos do coagulante, que funcionam como um balastro arrastando a matéria em suspensão para baixo.
- Os ensaios realizados permitiram concluir que a utilização do coagulante em estudo foi benéfica para a sedimentação das lamas primárias tendo permitido obter remoções de SST entre 81-96%; de SSV entre 57-94%; da CQO entre 34-53% e de fósforo entre 72-99%.
- A utilização de cal comercial nas mesmas concentrações que o coagulante não se mostrou eficaz na melhoria da sedimentação das lamas primárias, devido às baixas doses utilizadas. No entanto, com quantidades utilizadas foi possível remover até 50% dos sólidos suspensos totais e 73% dos sólidos suspensos voláteis do sobrenadante. No que se refere à remoção de CQO e de fósforo, o doseamento de cal comercial não se mostrou eficaz;
- Relativamente às lamas biológicas, o coagulante em estudo não foi tão impactante quanto foi nas lamas primárias. Em termos de sedimentação de lamas, o seu doseamento não potenciou melhorias sensíveis. Em relação à remoção de sólidos suspensos totais e voláteis do sobrenadante, os resultados foram distintos, variando entre os 23 e os 60% para os SST e entre os 15 e os 62% para os SSV. De notar que os maiores valores de eficiência de remoção de sólidos foram obtidos para as doses inferiores a 50mL de coagulante. Relativamente à remoção de fósforo, o coagulante mostrou-se eficaz, removendo quase na sua totalidade o fósforo presente no sobrenadante (87-95%). Para remoção da CQO, o doseamento de insolúveis da cal também se mostrou eficaz na sua remoção, tendo-se obtido eficiências de remoção entre 14-71%.
- Por comparação, o doseamento de cal comercial não se mostrou particularmente eficaz na melhoria da velocidade de sedimentação das lamas biológicas. No entanto, a utilização de cal mostrou-se eficaz na remoção de SST, SSV, CQO e Pt.
- De um modo geral, o recurso aos insolúveis da cal mostrou ser mais eficaz do que a cal comercial na melhoria da sedimentação de lamas e na remoção de SST, SSV, CQO e Pt do sobrenadante, pelo que poderá constituir uma alternativa viável.
- Em estudos futuros deverá ser realizada uma comparação entre as eficiências obtidas para cada um dos coagulantes em intervalos de pH semelhantes, uma vez que os valores de pH obtidos quando doseada cal comercial foram bastante menores aos obtidos quando doseada a dose equivalente em insolúveis da cal. Deverá também ser realizado um estudo técnico-económico de maneira a aferir a viabilidade económica da utilização dos insolúveis da cal.

8. Referências Bibliográficas

- Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2015). PENSAAR 2020. Em *PENSAAR 2020-Uma nova Estratégia para o Setor de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Andreoli, C. V., Lara, A. I. de, Lopes, D. D., Morite, D. M., Pegorini, E. S., Fernandes, F., ... Soccol, V. T. (2007). Sludge Treatment and Disposal. Em *Introduction to Wastewater Treatment Processes*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-576550-3.50010-2>
- Bazzaoui, R., Fraikin, L., Gros Lambert, S., Salmon, T., Crine, M., & Léonard, A. (2011). *Impact of sludge conditioning on mechanical dewatering and convective drying*. Obtido de http://www.uibcongres.org/imgdb/archivo_dpo11043.pdf
- Bishop, P. (1995). *Municipal Sewage Sludge: Management, Processing and Disposal*. Obtido de https://books.google.pt/books?id=U_HeEC0x6egC&pg=PA247&lpg=PA247&dq=factors+that+influence+sludge+conditioning&source=bl&ots=D41h-vIEOw&sig=ACfU3U32j3wNY_GcOMVkJ_CvjE5D1U9x8Tw&hl=pt-PT&sa=X&ved=2ahUKEwiQ_4S57ZTtAhWiyLUKHZTaBaoQ6AEwA3oECAkQAQ#v=onepage&q=fa
- Carlsson, B. (sem data). *An introduction to sedimentation theory in wastewater treatment*.
- Cunha, J. (2007). *Contribuição para a melhoria do processo de espessamento de lamas primárias em etar municipal*. Universidade de Coimbra. Obtido de https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/83393/1/Dissertação de Mestrado- Joana Cunha_FINAL-corrigida.pdf
- Diak, J. (2015). *FREEZE - THAW SLUDGE DEWATERING AND STABILIZATION USING FERRATE (VI)*. Carleton University.
- EPAL. (sem data). Estação de Tratamento da Asseiceira. Obtido 17 de Novembro de 2019, de <https://www.epal.pt/EPAL/menu/epal/publicações/vídeos/videos/default-source/videos/estactrataaguaass>
- European Commission. (2001). *Disposal and recycling routes for sewage sludge Part 3 – Scientific and technical report*.
- Ginisty, P., Olivier, J., Vaxelaire, J., & Fortuny, S. (2012). *Influence of flocculation on sewage sludge thickening and dewatering*. (March 2016).
- Grundfos. (sem data). Case Story - ETAR Castelo Branco. Obtido de <https://pt.grundfos.com/content/dam/BGP/Cases/CaseStoryETARCB.pdf>
- Huron, Y., Salmon, T., Crino, M., Bladin, G., & Léonard, A. (2010). *Effect of liming on the convective drying of urban residual sludges*. (August 2009), 111–137. <https://doi.org/10.1002/apj>
- Kynch, G. J. (1952). A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday Society*, 48, 166–176.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*.
- Neo Water Treatment. (2018). Reducing Polymers In Wastewater Treatment, Wastewater Treatment Plant. Obtido 11 de Julho de 2019, de <https://neowatertreatment.com/polymers-in-wastewater-treatment/>

- Ong, S. K. (2007). Wastewater Engineering. *Environmentally Conscious Materials and Chemicals Processing*, pp. 207–235. <https://doi.org/10.1002/9780470168219.ch8>
- Pinto, A. (2018). *Valorização de insolúveis de cal na operação de decantação primária assistida em tratamento de efluentes*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Pinto, A. (2019). *Avaliação do desempenho da desidratação mecânica por centrifugação de lamas anaerobiamente digeridas: Caso de estudo de seis ETAR em Portugal*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Pires, M. (2015). *Análise da eficiência do processo de digestão anaeróbia de lamas da ETAR municipal do Choupal*. Dissertação de Mestrado na área científica de Engenharia Química, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Obtido de [https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/40218/1/Analise da eficiencia de um processo de digestao anaerobia de lamas de ETAR municipal do Choupal.pdf](https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/40218/1/Analise%20da%20eficiencia%20de%20um%20processo%20de%20digestao%20anaerobia%20de%20lamas%20de%20ETAR%20municipal%20do%20Choupal.pdf)
- Qasim, S. R., & Zhu, G. (2018). Wastewater treatment and reuse theory and design examples: Volume 2: Post-treatment, reuse, and disposal. Em *Wastewater Treatment and Reuse Theory and Design Examples: Volume 2: Post-Treatment, Reuse, and Disposal*. <https://doi.org/10.1201/b22366>
- Ramos, M. (2011). *Análise comparativa de sistemas de desidratação para etar caso de estudo: centrífugas versus filtros banda*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Obtido de https://run.unl.pt/bitstream/10362/7506/1/Ramos_2011.pdf
- Rasquilha, F. (2010). *Contribuição para o tratamento e gestão das lamas em excesso das estações de tratamento de águas residuais – caso de estudo de optimização para 4 etar do concelho de elvas*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Obtido de https://run.unl.pt/bitstream/10362/4144/1/Rasquilha_2010.pdf
- Santos, F. (2011). *Optimização da Unidade de Desidratação de Lamas da Estação de Tratamento de Águas Residuais da UNICER - Santarém*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Obtido de https://run.unl.pt/bitstream/10362/10708/1/Santos_2011.pdf
- Santos, J. (2012). *METODOLOGIA DE TRATAMENTO DE LAMAS E ORGANIZAÇÃO DO BALANÇO DE MASSAS*. *Repositório Científico do Instituto Politécnico de Lisboa*. Obtido de [https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/1803/1/Dissertação.pdf](https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/1803/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf)
- Silva, A. (2015). *Estudo comparativo de sistemas de espessamento de lamas de ETAR*. Dissertação de mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do Território no instituto Politécnico de Viana do Castelo. Obtido de http://repositorio.ipv.pt/bitstream/20.500.11960/1440/1/Ana_Silva_1381.pdf
- Silva, M. (2010). *Ensaio de coagulação floculação da água residual afluenta à etar de avis*.
- Sperling, M. Von. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series (Volume 2)- Basic Principles of Wastewater Treatment*.
- SUEZ degremon. (2019). SUEZ's degremont® water handbook - Degremont®. Obtido 19 de Agosto de 2019, de <https://www.suezwaterhandbook.com/>
- SUEZ Degremont. (sem data). *Ampliação de ETA da Asseiceira*. Obtido 17 de Novembro de 2019, de <http://www.degremont.pt/pt/index.php/disenho-y-construccion/etap-dyc-ref/238-ampliacao-de-eta-da-asseiceira.html>
- SUEZ Degremont. (2019). *Anaerobic sludge digestion - Degremont® water handbook*. Obtido 12 de Agosto de 2019, de <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/liquid->

- The Institute of Water Pollution Control. (1981). *SEWAGE SLUDGE II: CONDITIONING , DEWATERING*. Obtido de <https://www.ircwash.org/sites/default/files/342-81UN-1268.pdf>
- Turovskiy, I. S., & Mathai, P. K. (2006). Wastewater Sludge Processing. Em *Wastewater Sludge Processing*. <https://doi.org/10.1002/047179161X>
- USEPA. (1979). *PROCESS DESIGN MANUAL FOR SLUDGE TREATMENT AND DISPOSAL*.
- USEPA. (2000). Wastewater Technology Fact Sheet Dechlorination. *Environmental Protection Agency*, 1–7. [https://doi.org/EPA 832-F-99-062](https://doi.org/EPA%20832-F-99-062)
- USEPA. (2003). *Biosolids Technology Fact Sheet Gravity Thickening*. Obtido de http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2006_10_16_mtb_heat-drying.pdf
- Vaxelaire, J., & Olivier, J. (2006). Conditioning for Municipal Sludge Dewatering. From Filtration Compression Cell Tests to Belt Press. *Drying Technology*, 24(10), 1225–1233. <https://doi.org/10.1080/07373930600838090>
- Vesilind, P. A., Wallinmaa, S., & Martel, C. J. (1991). Freeze–thaw sludge conditioning and double layer compression. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(6), 1078–1083. <https://doi.org/10.1139/I91-130>
- Victor, A. (2010). *Valorização Agrícola de Lamas de ETAR: Enquadramento e Perspectivas Futuras*. 89. Obtido de [https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/38551/1/Valorizacao agricola de lamas de ETAR_Enquadramento e perspectivas futuras.pdf](https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/38551/1/Valorizacao%20agricola%20de%20lamas%20de%20ETAR_Enquadramento%20e%20perspectivas%20futuras.pdf)

Anexo I – Metodologia para a determinação do pH

Princípio do método

A medição do pH neste trabalho foi efetuada pelo método potenciométrico. Esta determinação baseia-se no facto de a diferença de potencial que se estabelece entre um eléctrodo de vidro e um eléctrodo de referência (calomelanos), quando mergulhados na mesma solução, ser função linear do pH da solução.

Reagentes

Os reagentes utilizados têm como único objetivo a calibração do eléctrodo de pH:

- Solução para o padrão de pH 4
- Solução para o padrão de pH 7
- Solução para o padrão de pH 10

Equipamento

- Soluções tampão de calibração
- Medidor de pH, equipado com um eléctrodo combinado de pH e de preferência, com um eléctrodo de compensação automática da temperatura
- Agitador magnético e barra magnética

Modo Operatório

- Calibre o eléctrodo combinado de pH com as soluções de pH 7 e 4, ou 7 e 10 conforme a gama de pH em que poderá situar-se o pH da amostra.
- Depois da calibração coloque o eléctrodo na amostra, suspendendo-o na solução de forma a não tocar nas paredes do recipiente, e registe o valor obtido. Pode agitar-se a solução, mas deve-se esperar que repouse antes de registar o valor. Em alternativa pode-se colocar a amostra em agitação, durante 15s, num agitador magnético. Depois de desligar a agitação deve-se aguardar que o pH estabilize durante 2 min antes de registar a leitura obtida no medidor de pH.
- Pode acontecer que em algumas amostras a leitura fornecida pelo medidor de pH sofra alguns desvios. Nestes casos deve-se aguardar por uma leitura estável antes de registar o valor final.

Se a leitura não estabilizar, deve-se procurar calibrar de novo o eletrodo. Se o desempenho do eletrodo na calibração for aceitável, deve-se registrar o valor atingido após 5 minutos de permanência do eletrodo na amostra. O desvio pode ser devido a alterações químicas em progresso na amostra e não a deficiência do eletrodo.

- Registe o valor de pH com duas casas decimais.
- Lave o(s) eletrodos com água destilada e seque-o(s) entre cada medição. Quando não estiver em utilização, o eletrodo deve estar mergulhado em água destilada ou numa solução tampão. Os eletrodos novos devem ser limpos com uma solução ácida fraca (0,01M) e subsequentemente mergulhados em solução tampão de pH 4.

Anexo II – Sólidos em suspensão totais, voláteis e não voláteis

Sólidos em suspensão totais (SST)

- Prepare e pese uma cápsula de porcelana com uma membrana de microfibras de vidro do tipo Whatman GF/C (águas residuais) ou GF/F (águas de consumo humano) (A', g)
- Coloque a membrana filtrante no porta-filtros para filtração em vácuo
- Meça, com pipeta, um volume V de amostra (mL) e filtre-a em vácuo moderado para evitar danificar o filtro. Deixe secar o filtro, retire-o e coloque-o na cápsula.
- Coloque a cápsula em estufa a 103°C-105°C durante 1 a 2 horas
- Retire a cápsula para exsiccador e espere que arrefeça
- Pese a cápsula + SST em balança analítica (B'1)
- Volte a colocar a cápsula na estufa durante 1 a 2 horas
- Retire para exsiccador e espere que arrefeça
- Pese a cápsula + SST em balança analítica (B'2)
- Se $B'1 - B'2 < 0,5\text{mg}$, considere B'2 o peso final (B') (g). Caso contrário volte a colocar a cápsula na estufa mais 1 a 2 horas e repita o procedimento de arrefecimento e pesagem até obter um peso que não difira do anterior mais de 0,5mg.
- Calcule SST

$$SST \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} = (B' - A')V_{amostra} * 10^6$$

Sólidos em suspensão voláteis (SSV) e fixos (SSNV)

- Coloque a cápsula, com a membrana filtrante e SST secos, na mufla a 550°C durante 1 hora
- Retire para exsiccador e espere que arrefeça
- Pese a cápsula + SSNV em balança analítica (C') (g)
- Calcule SSV e SSNV

$$SSV \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{(B' - C')}{V_{amostra}} * 10^6$$

$$SSNV \text{ (mg.L}^{-1}\text{)} = \frac{(C' - A')}{V_{amostra}} * 10^6$$

Anexo III – Metodologia para determinação da CQO

Princípio do método

Para a determinação do oxigénio equivalente à matéria orgânica, utiliza-se um oxidante químico forte em quantidade conhecida, como o dicromato de potássio.

A oxidação deve ser feita num meio fortemente ácido, à temperatura de ebulição e o dicromato de potássio doseado em excesso. No final da reação, quantifica-se o excedente do oxidante utilizado através de uma titulação com uma solução de sulfato ferroso amoniacal de título conhecido.

O valor da CQO é calculado a partir da quantidade de dicromato consumido pelas matérias dissolvidas e em suspensão (1mol de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ é equivalente a 1,5mol de O_2).

Reagentes

- Ácido sulfúrico, $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 4 \text{ mol.L}^{-1}$;
- Ácido sulfúrico – Sulfato de prata;
- Dicromato de potássio;
- Sulfato de ferro (II) e amónio;
- Hidrogenoftalato de potássio;
- Ferroína.

Equipamento

- Aparelho de refluxo;
- Digestor: recod/6 da G. Vitaddini;
- Bureta de precisão, com 25mL de capacidade;
- Reguladores de ebulição;
- Agitador e barra magnéticos.

Procedimento

1. Dilua 10,0 mL da solução padrão de referência de dicromato de potássio em 100 mL de ácido sulfúrico e titule com a solução de sulfato de ferro (II) e amónio, na presença de 2 ou 3 gotas de indicador ferroína;
2. Faça uma toma de 10,0 mL de amostra (diluída se necessário) para um tubo do aparelho de refluxo, adicionando 5,00 mL da solução de dicromato de potássio e alguns reguladores de ebulição, agitando cuidadosamente;
3. Junte lentamente e com precaução 15 mL da mistura de ácido sulfúrico com sulfato de prata, fechando de imediato o tubo de ensaio com o refrigerante;

4. Leve a mistura reacional à ebulição em 10 minutos e continue a ebulição durante mais 110 minutos, mantendo a mistura reacional a $148^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$;
5. Arrefeça o tubo em água fria até atingir os 60°C , lavando simultaneamente o refrigerante com uma pequena quantidade de água.
6. Retire o refrigerante e dilua a mistura reacional a cerca de 75mL. Arrefeça até à temperatura ambiente;
7. Titule o excesso de dicromato com a solução de sulfato de ferro (II) e amónio, na presença de 1 ou 2 gotas da solução indicadora de ferroína.

- Ensaio em branco:

Efetuar em paralelo dois ensaios em branco com cada série de determinações, seguindo o procedimento de determinação da CQO, substituindo a toma de amostra por 10,0 mL de água destilada.

Cálculos

- A carência química de oxigénio, expressa em miligramas por litro, é dada pela seguinte equação:

$$CQO (mgO_2.L - 1) = \frac{8000.c.(V_1 - V_2)}{V_0}$$

Onde:

8000 – massa molar, em miligrama por litro, de $\frac{1}{2}$ de O_2 ;

c – concentração, em moles por litro, da solução de sulfato de ferro (II) e amónio;

V_0 – volume, em mililitros, da toma para ensaio antes da diluição;

V_1 – volume, em mililitros, da solução de sulfato de ferro (II) e amónio consumida no ensaio em branco;

V_2 – volume, em mililitros, da solução de sulfato de ferro (II) e amónio consumida no ensaio com a amostra.

- A concentração, c, expressa em moles por litro, da solução de sulfato de ferro (II) e amónio, é dada pela fórmula:

$$c = \frac{10,0 * 0,04 * 6}{V} = \frac{2,4}{V}$$

Onde V é o volume, em mililitros, da solução de sulfato de ferro (II) e amónio consumida na titulação determinada no ponto 1. do procedimento.

Anexo IV- Metodologia para a determinação da CQO (HACH-LANGE)

Fonte: HACH-LANGE (url: <https://pt.hach.com/teste-em-cuvete-de-cqo-1000-10-000-mg-l-o-sub-2-sub/product-downloads?id=26370274006>)

Equipamento necessário

- Espectrofotómetro multi-paramétrico HACH-LANGE, modelo DR3900;
- Digestor de amostras HACH-LANGE, modelo HT 200 S;

Reagentes

- Conjunto de reagentes e cuvete HACH-LANGE LCK014 para gama alta 1000 – 10000 mg.L⁻¹.
- Conjunto de reagentes do kit HACH-LANGE LCK514 para a gama 100 – 2000 mg.L⁻¹.

Procedimento

- Agite a cuvete;
- Com uma pipeta adicione à cuvete 0,5 mL (2mL para a gama 100 – 2000 mg.L⁻¹) da amostra a analisar;
- Feche a cuvete e agite-a;
- Coloque a cuvete no digestor HT 200 S a uma temperatura de 170 °C, durante um período de 15 minutos;
- Retire a cuvete do digestor e coloque-a num suporte adequado;
- Agite-a cuidadosamente e abra-a;
- Limpe a cuvete e leia o valor do CQO no espectrofotómetro.

Certificado de Qualidade (LCK014)

Quality certificate Technical data for Validation of LCK014 (1000-10000 mg/l COD)

Quality certificate

Technical data for cuvette test LCK014

Sensitivity	0.0002 Abs./(mg/l)
Ordinate intersect	0.050 Abs.
Residual standard deviation	0.0068 Abs.
Method variation coefficient	0,74 %
Method standard deviation	40 mg/l
Confidence intervall (95%)	± 98 mg/l

The technical data for cuvette test LCK014 were determined in conformity with ISO 8466-1 and DIN 38402 A51 „Calibration of analysis methods“.

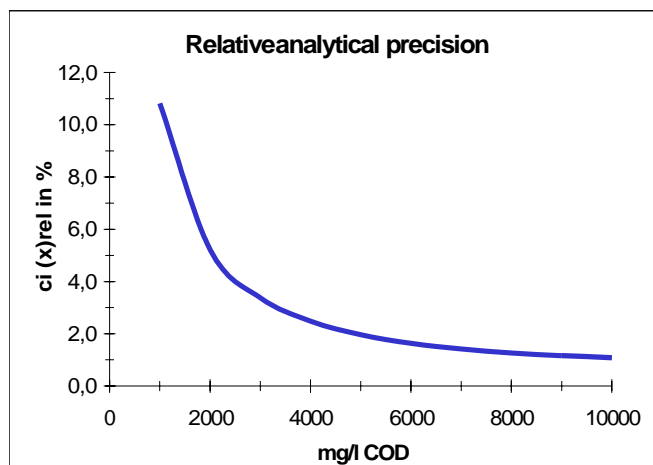
The series of the smallest and largest calibration standards exhibit normal distribution and are outlier- and trend-free.

The calibration gives a linear function.

Technical data in conformity with DIN 32645

Detection limit	16.7 mg/l
Quantitation limit	50.1 mg/l

The detection and the quantitation limits were determined in conformity with DIN 32645.



Result	Confidence intervall (95%)
2000 mg/l	± 104 mg/l
4000 mg/l	± 99 mg/l
6000 mg/l	± 98 mg/l
8000 mg/l	± 101 mg/l
10000 mg/l	± 108 mg/l

HACH LANGE GmbH
Quality Management

Dr. Ralf Kloos



HACH LANGE GmbH
Willstätterstraße 11
D-40549 Düsseldorf
Tel. +49 (0)211-52 88-320
Fax +49 (0)211-52 88-143
Kundenservice@hach-lange.de
www.hach-lange.de

Certificado de Qualidade (LCK514)

Quality certificate Technical data for Validation of LCK514 (100-2000 mg/l COD)

Quality certificate

Technical data for cuvette test LCK514

Sensitivity	0.0005 Abs./(mg/l)
Ordinate intersect	0.062 Abs.
Residual standard deviation	0.0017 Abs.
Method variation coefficient	0.33 %
Method standard deviation	3.5 mg/l
Confidence intervall (95%)	± 8.7 mg/l

The technical data for cuvette test LCK514 were determined in conformity with ISO 8466-1 and DIN 38402 A51 „Calibration of analysis methods“.

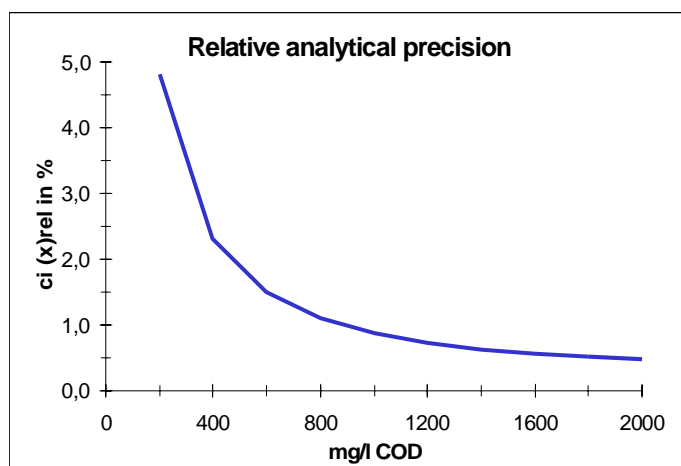
The series of the smallest and largest calibration standards exhibit normal distribution and are outlier- and trend-free.

The calibration gives a linear function.

Technical data in conformity with DIN 32645

Detection limit	4.6 mg/l
Quantitation limit	13.7 mg/l

The detection and the quantitation limits were determined in conformity with DIN 32645.



Result	Confidence intervall (95%)
400 mg/l	± 9.3 mg/l
800 mg/l	± 8.8 mg/l
1200 mg/l	± 8.7 mg/l
1600 mg/l	± 9.0 mg/l
2000 mg/l	± 9.6 mg/l

HACH LANGE GmbH
Quality Management

Dr. Ralf Kloos

Anexo V – Metodologia para determinação do Fósforo total

Fonte: Prof.^a Doutora Maria da Conceição Santos (Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia – U.N.L.)

Princípio do método

Redução de todas as formas de fósforo a ortofosfatos através de digestão com ácido sulfúrico e persulfato de amónio. O molibdato de amónio em conjunto com o tartarato de potássio e antimónio reagem em meio ácido com os ortofosfatos para formar o ácido fosfomolibdico, o qual é reduzido pelo ácido ascórbico a azul de molibdénio.

Regentes

- Solução de ácido sulfúrico;
- Persulfato de amónio (sólido) ou persulfato de potássio (sólido);
- Fenolftaleína;
- Hidróxido de sódio (1 N);
- Hidróxido de sódio (6 N);
- Solução concentrada e solução padrão de fosfato;
- Ácido sulfúrico (5 N);
- Solução de tartarato de potássio e antimónio;
- Reagente combinado: misture os reagentes acima mencionados nas seguintes proporções: 50 mL de H₂SO₄, 5 N; 5 mL de solução de tartarato de potássio e antimónio; 15 mL de solução de molibdato de amónio; e 30 mL de solução de ácido ascórbico. Agite entre cada adição. Espere que todos os reagentes estejam à temperatura ambiente antes de os misturar, e adicione-os segundo a ordem referida. Se observar a formação de um precipitado no reagente combinado agite o balão que o contém e aguarde alguns minutos até que a turvação desapareça. O reagente é estável durante 4 horas.

Equipamento

- Autoclave;
- Espectrofotómetro com possibilidade de efetuar leituras a 880 nm;
- Material de vidro lavado com ácido.

Procedimento

1. Pipete aproximadamente 75 mL de amostra para um frasco de digestão de 100 mL;
2. Adicione 2 gotas de fenolftaleína (se aparecer uma coloração rosa adicione, gota a gota, ácido sulfúrico até neutralizar a cor);
3. Adicione 1 mL da solução de ácido sulfúrico e 0,4 g de $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ sólido ou 0,5 g de $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ sólido;
4. Coloque o frasco de digestão no autoclave, a uma pressão entre 98 e 137 kPa, durante 30 minutos (em alternativa ferva durante 30 a 40 minutos ou até obter um volume final de 10 mL);

(nota: alguns compostos organofosforados podem necessitar de um período de digestão de 90 a 120 minutos para que a mesma se complete)

5. Arrefeça.
6. Neutralize com a solução de NaOH até ao aparecimento de uma ligeira coloração rosa.
7. Transfira a amostra para um balão volumétrico de 100 mL e perfaça-o com água destilada. Em algumas amostras pode ocorrer a formação de um precipitado, no entanto não se deve proceder à sua filtração;
8. Prepare uma curva de calibração com uma série de padrões contendo ortofosfato, pipetando os volumes de solução padrão de fosfato que constam na Tabela 0.1 para um copo de 100 mL ou frasco de digestão. Adicione água destilada até cerca de 75 mL e submeta estas soluções ao mesmo tratamento de digestão a que submeteu a amostra.

Tabela 0.1 Volume da solução padrão de acordo com a concentração de fósforo.

Volume de solução padrão (mL)	Concentração de fósforo ($\mu\text{g P-PO}_4^{3-}$ em 50 mL)
0	0
0,4	0,5
2,0	2,5
4,0	5,0
6,0	7,5
8,0	10,0
10,0	12,5

9. Arrefeça e neutralize com a solução de NaOH até ao aparecimento de uma ligeira coloração rosa;
10. Transfira as amostras para balões volumétrico de 100 mL e perfaça-os com água destilada;
11. Adicione 8,0 mL do reagente colorimétrico e aguarde pelo menos 10 minutos, mas não mais de 30 minutos, pelo desenvolvimento da cor;
12. Meça a absorvência no espectrofotómetro.

Anexo VI – Metodologia para determinação do Fósforo total (HACH-LANGE)

Fonte: HACH-LANGE (url: <https://pt.hach.com/teste-em-cuvete-para-fosfato-orto-total-2-0-20-0-mg-l-po-sub-4-sub-p/product-details?id=26370298049&callback=qs>)

Equipamento necessário

- Espectrofotómetro multi-paramétrico da HACH-LANGE: modelo DR3900;
- Digestor da HACH-LANGE: modelo HT 200 S.

Reagentes

- Conjunto de reagentes do kit HACH-LANGE LCK350 para a gama 2,0 – 20,0 mg/L;

Procedimento

1. Pipete 0,4 mL (0,5 mL para a gama 0,5 – 5,0 mg/L) da amostra a analisar para a cuvete;
2. Remover cuidadosamente a película da tampa (DosiCap Zip) da cuvete, invertendo-a e colocando-a novamente na cuvete;
3. Agite a cuvete e introduza-a de imediato no digestor (previamente aquecido a uma temperatura de 170°C) durante um período de 15 minutos;
4. Deixe arrefecer a cuvete;
5. Pipete 0,5 mL da solução B (0,2 mL para a gama 0,5 – 5,0 mg/L) e troque a tampa pela DosiCap C;
6. Agite a cuvete e espere 10 minutos;
7. Leia o valor do fósforo total no espectrofotómetro.

Quality certificate
Technical data for Validation
of LCK350 (2-20 mg/l Ptot,
Total Phosphor)

Quality certificate

Technical data for cuvette test LCK350
(Results as PO₄-P)

Sensitivity	0.049 Abs./(mg/l)
Ordinate intersect	0.107 Abs.
Residual standard deviation	0.0045 Abs.
Method variation coefficient	0.83 %
Method standard deviation	0.091 mg/l
Confidence interval (95%)	± 0.221 mg/l

The technical data for cuvette test LCK350 were determined in conformity with ISO 8466-1 and DIN 38402 A51 „Calibration of analysis methods“.

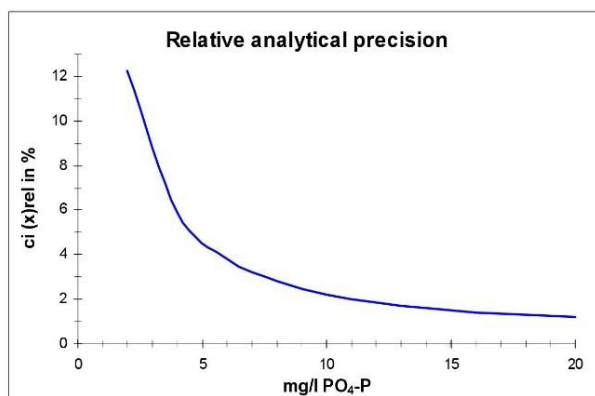
The series of the smallest and largest calibration standards exhibit normal distribution and are outlier- and trend-free.

The calibration gives a linear function.

Technical data in conformity with DIN 32645

Detection limit	0.052 mg/l
Quantitation limit	0.156 mg/l

The detection and the quantitation limits were determined in conformity with DIN 32645.



Result	Confidence interval (95%)
4.0 mg/l	± 0.235 mg/l
8.0 mg/l	± 0.224 mg/l
12.0 mg/l	± 0.221 mg/l
16.0 mg/l	± 0.228 mg/l
20.0 mg/l	± 0.245 mg/l

HACH LANGE GmbH
Quality Management


Dr. Ralf Kloos



HACH LANGE GmbH
Willstätterstraße 11
D-40549 Düsseldorf
Tel.+49 (0)211-52 88-320
Fax+49 (0)211-52 88-143
Kundenservice@hach-lange.de
www.hach-lange.de

Anexo VII – Análise à composição iónica da amostra de insolúveis da cal



Laboratório de Análises

Serviço de Espectroscopia de Emissão Atómica

Operator Carla Rodrigues

Internal number 19-1267

Submitted by Prof. Pedro Mano / DCEA

Analysis date 06-09-19

Responsible Prof. Pedro Mano / DCEA

Semi-quantitative analysis

		Elements concentration (mg/l)
Element	Line	Sample
Ag	328.028	ND
Al	396.152	0.88
As	189.042	ND
B	249.773	ND
Ba	455.403	1.10
Bi	223.061	ND
Ca	422.673	560
Cd	226.502	ND
Co	228.616	ND
Cr	267.716	ND
Cu	224.700	ND
Fe	259.940	0.17
Hg	194.163	ND
K	766.490	3.31
Li	670.784	ND
Mg	279.553	2.00
Mn	257.610	ND
Mo	202.030	ND
Na	588.995	1.42

Serviço de Espectroscopia de Emissão Atómica

Requimte/CQFB

Depto. de Química FCT/UNL

Campus de Caparica

2829-516 Monte de Caparica, Portugal

Tel: +351 212947805

Fax: +351 212948550

Email: cmr@fct.unl.pt

www.dq.fct.unl.pt/laboratorio-de-analises



requimte

rede de química e tecnologia
laboratório de análises

Laboratório de Análises

Serviço de Espectroscopia de Emissão Atómica

NI	221.647	ND
P	214.914	0.23
Pb	220.353	ND
Sb	206.833	ND
Se	196.026	ND
Si	251.611	0.94
Sn	189.989	ND
Sr	407.771	4.62
Ti	334.941	ND
Tl	190.864	ND
V	292.402	ND
W	207.911	ND
Zn	213.856	ND
Zr	343.823	ND

ND: not
detected

A Técnica

Carla Rodrigues

Serviço de Espectroscopia de Emissão Atómica

Requite/CQFB
Depto. de Química FCT/UNL
Campus de Caparica
2829-516 Monte de Caparica, Portugal

Tel: +351 212947805
Fax: +351 212948550
Email: cmr@fct.unl.pt

www.dq.fct.unl.pt/laboratorio-de-analises